•技术与方法•

中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法

高梅香^{1,2}, 刘启龙³, 朱家祺¹, 赵博宇⁴, 杜嘉⁴, 吴东辉^{4*}

1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江宁波 315211; 2. 宁波市高等学校协同创新中心“宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心”, 浙江宁波 315211; 3. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025; 4. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

摘要: 我国农田土壤动物面临严峻的多样性丧失问题, 建设监测样地并开展长期监测是解决该问题的重要途径, 但至今国内外仍缺乏农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法。依据BCI 50 ha大型固定样地建设规范, 参照我国已建成的森林和农田土壤动物大型固定样地监测经验, 本文提出了农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法。首先, 需要明确科学问题, 确定科学调查监测应遵守的基本原则。其次, 需要规范长期调查监测涉及的专业术语, 依据研究目的和实际情况选择地点和样地, 参照建设规范和农田特征建立农田土壤动物大型固定样地。第三, 以研究农田土壤动物多样性为核心, 揭示土壤动物在农田生态系统健康和功能中的作用, 有选择性地开展4类27项科学指标的长期监测工作, 要求按照统一的、规范化的工作流程开展野外调查和室内实验。最后, 要科学规范地完成标本的鉴定描述和保存保管, 研发体现农田土壤动物特征的数据库和管理信息系统。希望本文的研究结果能推动我国乃至世界范围的规范化样地建设和标准化网络监测, 为我国农田土壤动物评估与保护提供长期可靠的数据支撑。

关键词: 农田生态系统; 土壤动物多样性; 土壤动物监测指标; 土壤动物监测方法; 生物多样性保护和利用

高梅香, 刘启龙, 朱家祺, 赵博宇, 杜嘉, 吴东辉 (2022) 中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法. 生物多样性, 30, 21265. doi: 10.17520/biods.2021265.

Gao MX, Liu QL, Zhu JQ, Zhao BY, Du J, Wu DH (2022) Implementation protocol of scientific investigation and monitoring for permanent plots of agricultural soil animal in China. Biodiversity Science, 30, 21265. doi: 10.17520/biods.2021265.

Implementation protocol of scientific investigation and monitoring for permanent plots of agricultural soil animal in China

Meixiang Gao^{1,2}, Qilong Liu³, Jiaqi Zhu¹, Boyu Zhao⁴, Jia Du⁴, Donghui Wu^{4*}

1 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211

2 Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211

3 Geographical Science College, Harbin Normal University, Harbin 150025

4 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102

ABSTRACT

Aims: The soil ecosystem includes a lot of animals with representatives from almost all major taxa of terrestrial animals and may stand for one quarter of all currently described biodiversity. Nevertheless, biodiversity loss of soil animals has become a serious problem for agricultural ecosystems globally, especially in China. Though many solutions have been proposed, this problem has not been effectively tackled. Constructing permanent plots and monitoring them long-term has been regarded as an important and effective method for solving the challenge of soil animal biodiversity loss. However, we still know little about the implementation protocol of scientific investigation and monitoring of a permanent plot of agricultural soil animals, until now.

Methods: We propose the implementation protocol for scientific investigation and monitoring of permanent plots of

收稿日期: 2021-07-03; 接受日期: 2021-09-29

基金项目: 科技基础资源调查专项(2018FY100300)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wudonghui@iga.ac.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

agricultural soil animals in this study. The plot establishment and field investigation design are conducted according to the field protocol of the 50-ha Forest Dynamics Plot on Barro Colorado Island (BCI), Panama. The field investigation and long-term monitoring are carried out according to prior research of forest and farmland utilizing large permanent plots of soil animal in China.

Results: First, we must confirm which scientific questions need to be solved and decide the basic principles to be observed for scientific investigation and monitoring in permanent plots of agricultural soil animals. Eighteen scientific questions have been proposed from a basic theory and practical application standpoint, and four basic principles have been proposed: integrating the needs and ideas of scientific research and agricultural practice, scientific setting and selecting monitoring indices, concerning spatio-temporal heterogeneity and detection probability of monitoring indices, and emphasizing the effects of agricultural productions and human activities. Second, we need to standardize the terminology for long-term investigation and monitoring, such as site, plot, square, sample and specimen. Sites and plots should be selected according to research objectives and study area, and priority should be given to sites that are representative of typical agricultural activities and regional climatic characteristics. Then, the large permanent plot of agricultural soil animal can be established in terms of BCI 50-ha field protocols. Third, focusing on soil animal biodiversity and its effects on agricultural ecosystem health and function, we need to carry out long-term monitoring for four-class and twenty-seven-item scientific indices. Moreover, the field investigation and laboratory experiment should be performed based on a unified and standardized workflow. For field investigation, the working processes include drawing detailed sampling point map, training all investigators, looking for and locating the permanent plot of agricultural soil animals in the field using GPS or other instruments, labeling the sampling points in the permanent plot, and collecting samples. For laboratory experiment, different extracting methods for soil animals should be used according to different taxa characteristics and research objectives. Finally, we need to identify, describe, and preserve specimens scientifically. Researching and developing database and management information system that encompass the characteristics of soil animal are recommended. This process will help with data invoking, checking, analyzing, and mining later.

Conclusion: This study systematically puts forward the implementation protocol of scientific investigation and long-term monitoring of permanent plots of agricultural soil animals. The implementation protocol can be widely applied to almost agricultural ecosystems in China and can be used effectively to investigate and monitor all taxa of soil animals. The results of this study will promote standardized plot construction and network monitoring in China, and globally, as well as provide reliable long-term scientific data support for the assessment and protection of agricultural soil animals in China.

Key words: agriculture ecosystem; soil animal biodiversity; monitoring index of soil animal; monitoring method of soil animal; biodiversity conservation and utilization

土壤动物是农田生态系统重要的生物组分, 高的多样性对于提高土壤质量、维持土壤健康和保障粮食安全至关重要(Bardgett & van der Putten, 2014; 孙新等, 2021)。随着人类活动干扰和环境变化的不断加剧, 全球农田土壤动物正面临生物多样性减少、丰富度降低、均质化加剧等严峻问题(Geisen et al, 2019; Marsden et al, 2020; Beaumelle et al, 2021)。我国农田土壤动物同样面临前所未有的挑战和威胁(张卫信等, 2020), 为了应对前述挑战, 亟需解决我国农田土壤动物的几个关键科学问题: 我国农田土壤动物多样性现状如何? 在全球气候变化和人类活动强烈干扰下其动态发展规律是什么? 这种动态发展规律的驱动因素是什么? 如何保护和维持我国农田土壤动物多样性的结构和功能? 如何通过管理土壤动物多样性达到改善和提高农田土

壤质量的目的? 然而, 我们至今仍无法回答这些关键科学问题的一个重要原因是缺少标准化的土壤动物长期监测样地及调查规范、监测指标, 缺少长期的、连续的和高质量的土壤动物数据。

建立农田土壤动物长期监测样地, 开展长期、连续、科学、标准化的调查监测, 评估农田土壤动物多样性动态变化规律, 是揭示全球气候变化和人类活动等复杂过程影响下农田土壤动物多样性维持机制的重要基础, 也是保护农田土壤动物多样性、提高农田土壤质量和维持农田土壤健康的重要前提(马克平, 2011; 潘开文等, 2016)。国际上, 欧盟、加拿大等国家和地区较早开展了区域性的农田生物多样性监测和评价工作, 如欧盟的农场景观异质性、生物多样性和生态系统服务国际网络计划(International Network on Farmed Landscape

Heterogeneity, Biodiversity and Ecosystem Services), 该计划在德国、法国、西班牙、英国和加拿大等国的8个农业区, 调查了鸟类、维管植物、蝴蝶、蜜蜂、食蚜蝇、步甲和蜘蛛等生物类群的多样性(<https://www.farmland-biodiversity.org/index.php?subject=1&lang=en>)。一些西欧国家和埃及共同发起的“有机和低投入农田系统的生物多样性指标”(Biodiversity indicators for organic and low-input farming systems)项目, 调查了蚯蚓、维管植物、蜜蜂和蜘蛛等几个重要的农田生物类群(Dennis et al, 2009)。这些调查和监测工作同时兼顾了多个类群, 但均未将土壤动物作为主要研究对象, 国内外以土壤动物为研究对象的农田长期监测工作仍需完善和发展。

农田土壤动物的长期调查监测需应对更大的困难和挑战。不同于较早开展的植被、鸟类、蝴蝶等类群的调查监测, 土壤动物多样性的野外调查需要在不透明的、复杂的、三维的地下生境中, 调查体型微小的、移动性强的、数量丰富的土壤动物, 且后续的分离、分拣和鉴定也是耗时的、极具挑战性的工作, 这是目前全球农田土壤动物多样性监测工作相对困难和落后的主要原因之一。我国农田土壤动物长期监测工作起步相对较晚, 2015年在吉林省德惠市建设了我国第一个东北黑土农田土壤动物大型固定样地, 并开展了系统性的长期调查监测(刘洁等, 2017), 该样地对揭示我国东北黑土农田土壤动物多样性维持机制发挥了重要作用(Guo et al, 2019; Liu et al, 2019; Gao et al, 2021)。但在国家尺度上, 农田土壤动物长期监测样地尚未完善, 亟需在我国农业区建设监测网络并开展长期监测。

大型固定样地为生物多样性长期调查监测提供了有效平台(马克平, 2008), 该类样地监测面积大、监测周期长、建设和监测标准统一, 为解决生物多样性关键科学问题提供了有效途径(Condit, 1995)。中国从2004年开始建设了基于大型监测样地的中国森林生物多样性监测网络(CForBio, www.cfbbiodiv.org), 该平台的研究成果在探讨森林物种分布格局和生物多样性维持机制等方面做出了重要贡献(马克平和徐学红, 2020)。我国学者已经基于森林大型固定样地开展了较长时间的土壤动物多样性监测与研究(Gao et al, 2017, 2018; 高梅香

等, 2018a, b), 积累了一定的认识, 但缺乏基于农田土壤动物大型固定样地的研究(刘洁等, 2017; Liu et al, 2019), 国际上相关样地的建设、监测和研究成果更是少见。依据BCI (Barro Colorado Island) 50-ha大型固定样地建设规范(Condit, 1995), 参照我国森林和农田土壤动物大型固定样地的建设和监测经验(刘洁等, 2017; Gao et al, 2018), 本文将阐述农田土壤动物长期监测样地的建设及监测方案, 以期推动我国乃至世界农田土壤动物多样性监测工作的开展。

1 科学问题和基本原则

1.1 拟解决的科学问题

农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题为: 阐明农田土壤动物多样性的基本特征、动态变化规律、维持机制和功能作用, 揭示全球变化、人类活动和生物多样性入侵等多重胁迫下农田土壤动物多样性的响应规律和驱动机制, 为保护和维持农田土壤动物多样性、维持和改善土壤健康等科学实践和管理决策提供理论指导。以下从两方面来叙述拟解决的具体科学问题:

(1)在基础理论方面。主要以农田土壤动物多样性为核心, 在物种、功能和遗传多样性等多个维度上, 阐明土壤动物多样性的时空格局及其动态变化规律, 说明多样性与自然环境因子之间的相互作用关系, 揭示多样性的维持机制, 研究多样性的时空尺度依赖性, 阐明多样性对农田生态系统功能的作用, 揭示土壤动物多样性对土壤修复、土壤健康和粮食安全的作用等(Box 1, I-1到I-8)。说明土壤动物多样性与农业耕种历史、人类持续活动和社会生产需求之间的关系, 揭示在全球变化和人类活动等多重胁迫下农田土壤动物多样性的动态变化规律, 阐明该动态变化的关键驱动因子和内在机理, 从区域性、社会性和系统性的视角为土壤动物多样性保护提供理论指导(Box 1, I-9到I-13)。

(2)在实践应用方面。将科学研究获得的理论知识和方法技术相结合, 应用于具体的多样性维护、农田管理和生产实践中, 以提高农田土壤动物多样性、维持多样性的稳定性、发挥多样性的多功能为基本目标, 以期在改善农田土壤质量、调控农业病虫害、发展生态农业、实现绿色生产和保障粮食安全等方面发挥作用(Box 1, II-1到II-5)。

Box 1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(英文对照见附录1)

基础理论

- I-1 我国农田土壤动物多样性的现状如何? 其物种、功能和遗传多样性有何特征?
- I-2 我国农田土壤动物 α 、 β 和 γ 多样性的时空格局是什么? 形成和维持这些时空格局的机制是什么?
- I-3 我国农田土壤动物多样性与自然因子、人类活动如何相互作用? 农田中强烈的人类活动是否改变了土壤动物与自然环境之间的相互作用关系?
- I-4 我国不同农业区农田土壤动物多样性的时空格局是什么? 形成和维持不同农业区土壤动物多样性时空格局的因子和机制是什么?
- I-5 土壤动物多样性与农田生态系统的生产力和稳定性有什么关系? 土壤动物多样性对农田生态系统的生产力和稳定性有什么作用?
- I-6 农田土壤动物多样性的生态系统功能表现在哪些方面? 在强烈人类活动干扰下农田土壤动物多样性的生态系统功能如何动态响应和变化?
- I-7 土壤动物多样性与其他类群多样性有何关系(如土壤微生物、田鼠、鸟类、授粉昆虫、植株害虫)? 土壤动物与其他类群多样性的级联效应与关键生态系统功能(如作物产量、碳固持)存在怎样的内在联系? 其作用机制是什么?
- I-8 全球变化背景下土壤动物与作物、其他动物物候规律的匹配度如何? 这种匹配度有怎样的动态变化规律? 其背后机制是什么?
- I-9 我国农田土壤动物多样性在农业开发历史过程中发生了怎样的变化? 哪些物种对农业活动响应敏感? 哪些物种适应强烈的农业活动?
- I-10 我国不同农业区农田土壤动物多样性的变化规律是什么? 哪些物种及哪些区域是土壤动物多样性保护的热点?
- I-11 人类活动是否导致农田土壤动物多样性的均质化现象? 哪些农业区的均质化现象最明显? 从局域到区域尺度应对农田土壤动物均质化现象的对策是什么?
- I-12 在当前农业管理模式和未来可能的气候变化情景下, 我国农田土壤动物多样性会怎样变化和响应? 不同农业区的农田土壤动物如何变化和响应? 应该如何高效地监测和预测这些变化和响应?
- I-13 土壤动物多样性指示农田生态系统健康的关键生态系统功能有哪些?

实践应用

- II-1 哪些实践活动可以提高和维持农田土壤动物多样性? 如何有效指导农户和当地相关部门提高和维持农田土壤动物多样性?
- II-2 哪些实践活动可以维持土壤动物多样性的稳定性、抗干扰性和持续性? 如何指导农户和当地相关部门维持农田土壤动物多样性的稳定性、抗干扰性和持续性?
- II-3 哪些实践活动可以维持和发挥农田土壤动物多样性的功能, 如维持较高生产力、调控害虫、维持生态平衡等?
- II-4 哪些以土壤动物多样性为核心的实践活动可以提高土壤质量、维持土壤健康和提高粮食产量? 如何通过指导实践活动达成前述目标?
- II-5 哪些以土壤动物多样性为核心的实践活动可以促进生态农业旅游发展、提高农民收入和维持乡村稳定?

1.2 应遵守的基本原则

农田土壤动物长期监测样地的建设和监测应遵循如下原则:

(1)整合科学研究和农业实践两方面的需求与理念。目前生物多样性监测网络较多关注科学研究方面的需求, 这对于揭示生物多样性维持机制、阐明生物多样性与生态系统稳定性关系、明确生物多样性的功能作用、预测生物多样性对多重胁迫的响应有突出贡献。但农田生态系统还兼具生产、生活

与服务功能, 农田健康和农业持续是粮食生产和人类福祉的基础保障, 所以农田土壤动物长期监测不能忽视农业实践这一重要过程。只有秉持科学研究和农业实践双赢的需求和理念, 才能获得更有科学和社会价值的监测数据, 才能为生物多样性保护和人类健康提供高质量的、可靠的数据积累(万宏伟等, 2013)。

(2)科学地设置和筛选监测指标。必须保证农田土壤动物长期监测数据的质量, 这是实现科学研究

与农业实践双赢的基础前提, 监测指标的数量和质量直接影响监测数据质量。少而精的监测指标能实现具体和灵活的监测工作, 所获数据能满足科学研究和农业实践的基本需求, 优点是可获得针对单个类群的高质量和高精度数据, 维持和运行长期监测的任务轻且投入小, 缺点是无法全面反映土壤动物多样性的整体规律和变化。多而全的监测指标能实现系统和全面的监测工作, 所获数据能满足科学研究和农业实践的深度需求, 优点是可获得生物多样性整体的现状和变化规律, 缺点是不得不简化针对单个类群的监测内容, 导致监测数据的精度无法满足单个类群研究的需求, 且维持和运行长期监测的任务重、投入大。因此, 建立农田土壤动物多样性长期监测指标体系时, 需要对监测指标进行科学的设置、评估与筛选(万宏伟等, 2013)。

(3)关注监测指标的时空异质性和检出概率。不同物种具有不同的时空分布特征, 单个物种在其分布区内也存在明显的时空异质性。因此, 长期监测样地的面积、位置及监测时间和方法, 均会影响监测指标的检出概率和准确度、精确度。所以, 建设农田土壤动物长期监测样地要科学与合理地设置样地数量、面积、位置及监测时间和方法, 兼顾监测指标的时空异质性, 提高监测指标的检出概率和准确度、精确度(万宏伟等, 2013)。

(4)重视农业生产和人类活动的影响。农田土壤动物受强烈、持续的农业生产和人类活动影响(Bandeira et al, 2020; Mcinga et al, 2020), 因此农田土壤动物的长期监测要重视与农业生产和人类活动相关的监测指标, 这是在农田生态系统监测土壤动物多样性的独特之处。

2 建设方案

2.1 样地建设和监测的专业术语

农田土壤动物长期监测样地由若干个农田土壤动物大型固定样地组成, 单个大型固定样地涉及以下几个专业术语: 地点、样地、样方、样品和标本(图1)。

(1)地点。指的是大型固定样地所在的地点, 如商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地的地点为我国河南省商丘市(33°44′–34°52′ N, 116°39′–144°49′ E)(图1a)。

(2)样地。指的是大型固定样地, 如已建成的商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地(34°30′ N, 115°35′ E)(图1b)。

(3)样方。指的是在大型固定样地内划分的样方, 包括最小样方和实际调查样方。最小样方指的是该大型固定样地建设的最小空间粒度的样方, 如商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地是按照5 m为间隔进行划分的, 划分出了3,600个5 m × 5 m的小样方, 则该大型固定样地的最小样方为5 m × 5 m。实际调查样方指的是根据研究目的而设计的实际调查样方大小, 如在商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地内, 根据研究目的需要以20 m为间隔调查中型土壤动物样品, 则该样地内的225个20 m × 20 m的样方即为实际调查样方; 又如设置5个10 m × 10 m的小样方以调查蚯蚓群落, 则这5个10 m × 10 m的小样方即为实际调查样方。所以, 对于一个农田土壤动物大型固定样地来说, 最小样方的面积在样地建设之初是固定的, 具有相对的稳定性, 当然后期也可以进一步细化最小样方面积; 而实际调查样方的大小则是根据研究目的进行调整和设置的, 具有相对的灵活性和变异性(图1c)。

(4)样品。指的是在样地内使用一定的调查和监测方法获得的实验样品, 如使用内径为7 cm的土钻挖取的0–15 cm土壤样品, 使用直径为7 cm的陷阱捕获的地表节肢动物样品, 这里的土壤样品和地表节肢动物样品都被称为样品(图1d)。

(5)标本。指的是对采集的样品进行实验处理之后获取的标本, 例如从一个0–15 cm土壤样品中分离出来的所有跳虫标本, 使用陷阱捕获到的所有地表节肢动物标本(图1e)。

2.2 农田环境及地点的选择

选择和确定农田环境及地点是建设农田土壤动物长期监测样地首先要考虑的问题, 应选择具有代表性的农田环境及地点。所谓代表性, 是指在该农田环境和地点进行的农业生产活动能体现该区域的人类活动特征和气候环境特征。例如, 已经完成和正在建设的我国4个农田土壤动物大型固定样地, 便体现了其分布区域农业生产活动的典型特征(表1)。分布在不同地点的农田土壤动物大型固定样地, 构成了建设标准统一、监测方法规范的中国农田土壤动物长期监测网络。

图1 农田土壤动物长期监测样地建设和监测的基本概念。(a)、(b)、(c)、(d)和(e)分别为地点、样地、样方、样品和标本。图片(e)中的数字代表每只动物的序号。
Fig. 1 Basic conceptions of constructing and monitoring in agricultural soil animal permanent plot. (a), (b), (c), (d) and (e) represent site, plot, square, sample and specimen, respectively. The numbers labeled in picture (e) represent animal's orders.

表1 中国东部农区农田土壤动物大型固定样地的基本信息
Table 1 Basic information in permanent plots of agricultural soil animal in agricultural regions in eastern China

区域 Area	空间坐标 Space coordinates	样地名称 Plot name	地点 Location	土壤类型 Soil type	耕作模式 Farming mode
东北平原 Northeast Plain	44°52' N, 125°72' E	德惠黑土农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Black Soil Farmland in Dehui	吉林省德惠市 Dehui City, Jilin Province	黑土 Black soil	旱地, 玉米 Dry land, corn
华北平原 North China Plain	34°30' N, 115°35' E	商丘潮土农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Fluvo-aquic Soil Farmland in Shangqiu	河南省商丘市 Shangqiu City, Henan Province	潮土 Fluvo-aquic soil	旱地, 小麦-玉米轮作 Dry land, wheat-corn rotation
长江中下游平原 The plains of the middle and lower reaches of the Yangtze River	29°76' N, 121°56' E	宁波黄壤农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Yellow Soil Farmland in Ningbo	浙江省宁波市 Ningbo City, Zhejiang Province	黄壤 Yellow soil	小麦-水稻轮作 Wheat-rice rotation
珠江三角洲 Pearl River Delta	23°18' N, 114°48' E	惠州红壤农田土壤动物大型固定样地 Large Permanent Plot of Soil Animal in Red Soil Farmland in Huizhou	广东省惠州市 Huizhou City, Guangdong Province	红壤 Red soil	小麦-水稻轮作 Wheat-rice rotation

2.3 样地的选择

确定农田土壤动物大型固定样地的农田环境和地点之后, 在当地典型的农田生态系统中选择与设置大型固定样地。依据BCI 50 ha大型固定样地建设规范(Condit, 1995), 参照我国森林和农田土壤动物大型固定样地的建设和监测经验(刘洁等, 2017; Gao et al, 2018), 考虑农田生态系统和农田土壤动物的特征, 建议将农田土壤动物大型固定样地的基

本面积设置为300 m × 300 m。森林大型固定样地的面积多为1–60 ha (投影面积) (许涵等, 2015), 农田土壤动物大型固定样地的基本面积也是可变的。受到野外农田环境复杂性和所有权、使用权等限制, 可以根据需要和实际情况设置相对面积更大或更小的样地。需尽量保证样地为正方形, 这有利于后续的统计分析和数据挖掘。选择样地的原则如下:
(1)典型性。研究者需参考航片、地形图、统计

年鉴等资料, 并与当地农户、专家和相关部门等交流, 通过多次野外踏查来考察地形地貌、土壤类型、种植方式、管理方式等特点, 确保样地在气候、土壤、地形、耕作历史、耕作模式、作物类型等方面具有所在区域的典型性和代表性。当然, 为了扩大和丰富农田土壤动物长期监测样地的类型和监测内容, 也可以选择那些不具有典型性、却具有鲜明特色和发展潜力的农田来建设样地, 如油菜、花生、马铃薯农田等。

(2)完整性。指的是农田面积需占样地总面积的90%以上, 样地尽量不要被道路、河流、村庄及其他生境斑块(如湿地、林地)等分割。样地最好远离村庄、河流、畜禽场所等, 避免这些场所对样地建设和长期监测带来的潜在影响。

(3)便利性。样地所在位置和基础设施要便于野外长期调查监测。样地建设和后续的长期监测需要大量的工具和材料, 采集的样品量较大, 如果交通不便或基础设施无保障, 一方面会增加工作的难度, 另一方面会降低长期监测的效率, 从而降低调查和监测数据的质量。

(4)监测和保护的持续性。多次调查和长期监测是实现数据长期积累的重要前提。建议将农田设置在农业站或生态站等长期监测平台内, 一方面这些平台有齐全的本底和历史资料, 有助于深入挖掘监测数据并解决相关科学问题; 另一方面这些平台有长期稳定的运行机制, 有助于保证样地的完整性和持久性。如果所选择区域没有可供选择的农业站或生态站, 可以和农户、相关部门等签订长期租赁合同。

(5)面积、形状和方向的一致性。可根据所选择农田的实际情况进行设计和建设。土壤动物大型固定样地的面积通常为9 ha, 根据需要可以设置更大或更小的样地。形状尽量为正方形, 样地的建设即单元格网的走向最好与田垄走向保持一致。

2.4 样地的建设

以商丘市9 ha农田土壤动物大型固定样地为例, 其建设流程如下:

(1)布设样地控制网。森林大型固定样地内胸径 ≥ 1 cm的木本植物都被进行了定位和调查(Condit, 1995), 但农田大型固定样地内无法对所有的土壤动物个体进行定位和调查。可以将其分割成大量的较小样方进行调查以达到类似效果, 根据需要可将

最小样方定义为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 、 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 、 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 甚至更小。农田土壤动物大型固定样地的最小样方并没有固定面积, 显然最小样方的面积越小越能详尽地揭示土壤动物多样性特征, 但也要考虑测绘精度、测量误差和研究目的等方面。所以在选择的商丘市样地内布设控制网时, 首先使用经纬仪和RTK选取1个面积为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的样地, 然后将样地划分成3,600个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的最小样方; 该 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的最小样方并非固定, 将来可以将其进一步划分为面积更小的最小样方。然后标注该样地内所有网格交叉点的空间位置 and 空间坐标, 标注样地内所有特殊地物的空间坐标, 如水井、供电箱、电线杆等。

(2)测量样地和布置地面控制点。选择样地的1个顶点(如西南角顶点)作为该样地的坐标原点, 记为O点(0, 0), 实地测量该原点的地理坐标、海拔高度、周围地形特征等数据。农田土壤动物大型固定样地至少需测量4个地面控制点, 包括3个永久和1个备用地面控制点。精确地选择和布置地面控制点, 既是样地长期监测过程中再放样的精准参照, 也是对全球所有样地进行精准定位和大尺度分析的关键信息。地面控制点可以作为样地的永久地标, 建议布设在大型固定样地的外围, 最好同时具备地物标记明显、不易发生变动、容易寻找和再定位的典型特征。使用经纬仪和RTK精准确定每个地面控制点的坐标, 然后做永久标记。可以采用以下几种方法永久标记地面控制点: (1)将永久地标埋设于地表。在地下挖出大小合适的土坑, 埋设用来做标记的水泥桩, 在露出地面的水泥桩上进行地理标记。该方法的缺点是过于明显, 若影响到当地人的正常生产活动, 很容易被当地农民移除。(2)将永久地标埋设于地下。在地下挖取1 m深的土坑, 然后灌注满水泥, 待稍干后进行地理标记。其优点是不易被发现, 但若是遇到当地农户更改土地利用方式, 该地标也会被发现、破坏和移除。(3)使用干石灰做标记, 俗称灰桩。使用土钻打出深度为1 m的土坑, 在土坑内灌满粉末状干石灰。优点是标记时间持久, 即便是上层土壤被挖取或移除(只要深度不超过1 m), 下层石灰仍可起到永久标记的作用(附录2)。

(3)绘制室内地形图和设计图。基于AutoCAD等软件, 生成商丘市农田土壤动物大型固定样地完

整的地形图和设计图, 包括等高线、地物特征符号和规则格网等(附录3), 然后将该空间信息传输到RTK中。

(4)野外放样和定位。使用经纬仪和RTK放样, 将所有的样点都放到农田大型固定样地中, 误差控制在3–5 cm。在每个样点插上临时空间地标, 如红色小旗、彩色园艺标签等(附录4)。这些临时地标仅用于野外调查, 调查结束后可移除。

(5)检查样地和拍摄图片。样地建设完毕后对所有空间样点进行整理和检查, 对于需要添加和修改的空间样点进行再次测绘和放样, 为后续调查工作做充分准备。使用无人机拍摄农田土壤动物大型固

定样地的整体图片, 使用普通相机获得多个不同视角、体现不同特征的图片, 用于后期数据库建设和数据挖掘工作(附录4)。

3 监测指标体系和监测方法

3.1 监测项目和监测指标

根据农田土壤动物长期监测样地的总体目标和拟解决的科学问题, 我们提出一个以农田土壤动物多样性为核心, 兼顾土壤动物在农田生态系统健康和功能中作用, 包括4类27项具体指标的监测指标体系(表2)。表2中, I是农田土壤动物多样性野外调查内容和监测指标, 其目的是获取物种和功能多

表2 农田土壤动物长期监测样地中的获取指标
Table 2 Collected indices obtained from agricultural soil animal permanent plot

类别 Type	序号 No.	监测对象 Monitoring object	监测指标 Index	获取途径 Acquiring source	调查必要性 Necessity of investigation
I	1	土壤动物群落物种组成 Species composition of soil animal community	土壤动物物种名录 Species list of soil animal community	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	2	土壤动物多度 Soil animal abundance	生物量和密度 Biomass and density	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	3	物种功能性状 Species functional trait	体长、体宽、翅长等 Length, width, wing length, etc. (依据不同类群特征确定 Selecting according to the characteristics of target group)	野外取样、室内分析、文献检索 Field sampling, laboratory analysis and literature retrieval	必须 Essential
	4	多样性 Diversity	α 多样性、 β 多样性、 γ 多样性、物种丰富度、物种均匀度、功能多样性、遗传多样性 α diversity, β diversity, γ diversity, species richness, species evenness, functional diversity and genetic diversity	计算分析 Calculation and analysis	必须 Essential
II	5	微生物多样性 Microbial diversity	分类操作单元 Operational taxonomic units (OTUs)	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	6	啮齿动物多样性 Rodent diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外调查和社会调研 Field sampling and social investigation	可选 Selectable
	7	植株上的昆虫多样性 Insect diversity in plant	物种数、个体数、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	8	鸟类多样性 Bird diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	9	蝴蝶多样性 Butterfly diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样, 室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	10	授粉者多样性 Pollinator diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样, 室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable
	11	害虫多样性 Pest diversity	物种数、个体数、生物量、活动时间、物种多样性指数、功能性状指数等 Species richness, individual, biomass, activity time, species diversity index, functional trait index, etc.	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	可选 Selectable

表2 (续) Table 2 (continued)

类别 Type	序号 No.	监测对象 Monitoring object	监测指标 Index	获取途径 Acquiring source	调查必要性 Necessity of investigation
III	12	土壤碳、氮、磷储量 Carbon, nitrogen and phosphorus reserves in soil	土壤碳、氮、磷含量 Soil carbon, nitrogen and phosphorus content	野外取样和室内分析 Field sampling and laboratory analysis	必须 Essential
	13	土壤养分 Soil nutrient	全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH等 Total N, total P, total K, available N, available P, available K, soil pH, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、必须 无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	Essential
	14	土壤微量元素和重金属 Trace element and heavy metal element in soil	全锰、有效锰、全锌、有效锌、全铜、有效铜、全铁、有效铁等 Total Mn, available Mn, total Zn, available Zn, total Cu, available Cu, total Fe, available Fe, etc.	野外取样、室内分析、台站共享 等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	15	土壤物理性质 Soil physical property	土壤类型、质地、孔隙度、含水量、容重、机械组成、土层深度等 Soil type, texture, porosity, water content, bulk density, mechanical composition, soil depth, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、必须 无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	Essential
	16	土壤速效微量元素 Soil available trace element	有效铁、有效铜、有效锰、有效锌等 Available Fe, available Cu, available Mn, available Zn, etc.	野外取样、室内分析、台站共享 等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	17	土壤可溶性盐 Soil soluble salt	碳酸根、重碳酸根、硫酸根、氯根、钙离子、镁离子、钾离子、钠离子、全盐量、电导率等 Carbonate, bicarbonate, sulfate radical, chloride, calcium ion, magnesium ion, potassium ion, sodium ion, total salt content, conductivity, etc.	野外取样、室内分析、台站共享 等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, etc.	可选 Selectable
	18	农作物基本要素 Basic element of crop	作物种类、名称、品种、播种面积、单产、总产、产值、根部生物量、农田的复种指数、轮作体系等 Crop type, name, variety, sown area, yield, total yield, production value, root biomass, multiple cropping index of farmland, rotation system, etc.	野外取样、室内分析、台站共享、必须 无人机遥感等 Field sampling, laboratory analysis, data share by ecological station, unmanned aerial remote sensing, etc.	Essential
	19	空间坐标 Space coordinates	样地的空间坐标、样品的空间坐标 Space coordinates of the site, space coordinates of the sample	野外测量 Field survey	必须 Essential
	20	地形因素 Topographic factor	海拔、坡向、坡度、地表起伏度等 Elevation, aspect, slope, relief degree of land surface, etc.	现场勘测和DEM数据计算获得 Site survey and calculation from DEM data	必须 Essential
	21	土地利用 Land use	土地利用类型、强度、历史等 Land use type, intensity, history, etc.	遥感、社会调查、文献检索 Remote sensing, social survey and document retrieval	必须 Essential
IV	22	景观因素 Landscape factor	斑块面积、斑块密度、景观分离指数、Shannon多样性指数 Patch area, patch density, landscape separation index and Shannon's diversity index	遥感 Remote sensing	可选 Selectable
	23	地史进化因素 Geographical evolution factor	地质历史和进化历史 Geological and evolutionary history	文献检索和谱系分析 Document retrieval and phylogenetic analysis	可选 Selectable
	24	社会经济因素 Socioeconomic factor	人口数量、生活来源、人均收入、学校数量、人口老龄化指标等 Population size, source of income, per capita income, no. of schools, population aging indicators, etc.	社会调研、年鉴统计、资料检索 Social investigation, statistical yearbook and document retrieval	必须 Essential
	25	肥料投入情况 Fertilizer inputs	施用肥料名称、作物生育时期、施用日期、施用方式、施用量、含氮量、含磷量、含钾量等 Name of fertilizer, crop growth period, application date, application method, application amount, nitrogen content, phosphorus content, potassium content, etc.	野外采样和台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential
	26	农药、除草剂、生长剂投入情况 Inputs of pesticide, herbicide, growth promoter	施用药剂名称、主要有效成分、施用日期、施用量、施用方式等 Drug name, main active ingredient, application date, application amount, application method, etc.	野外采样和台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential
	27	灌溉制度 Irrigation system	灌溉时间、作物生育期、灌溉水源、灌溉方式、灌溉水量等 Irrigation time, crop growth period, irrigation water source, irrigation method, irrigation water volume, etc.	野外采样, 台站共享 Field sampling and data share by ecological station	必须 Essential

样性指标, 其调查必要性均为必选; II是农田生态系统健康和关键生态系统功能指标, 其目的是获取土壤动物与农田健康和功能紧密相关的重要指标, 其调查必要性均为可选, 可依据研究目的选择是否长期监测; III是关键环境因子指标, 其目的是获取与土壤动物多样性维持、功能作用等相关的自然环境指标, 其调查必要性为必选和可选; IV为人类管理行为和社会经济影响指标, 其目的是获取土壤动物对人类活动响应相关的指标, 因为农田土壤动物受人类活动的强烈干扰和影响, 所以这些指标为必选。

3.2 野外调查和监测流程

野外调查之前首先确定调查的样点数量、类群、方法、时间和人员等, 制定详细的野外调查方案和工作计划, 并绘制详细的采样方案布点图(图2)。图2a为农田土壤动物长期固定样地调查时通用的样点布设方案, 这首先是参照CTFS土壤采样方案进行的规划与设计, 便于与全球森林生物多样性监测网络(CTFS, <http://www.ctfs.si.edu/>)和中国森林生物多样性监测网络(CForBio, www.cfbiodiv.org/)的样地数据进行对比(Anderson-Teixeira et al, 2015; 马克平, 2015); 其次CTFS土壤取样设计结合了规

则采样和随机采样方法, 鉴于土壤动物室内鉴定及相关分析的复杂性、耗时性, 考虑减少对农田土壤破坏的目的, 农田土壤动物长期固定样地采样方案仅保留了CTFS土壤取样设计中的规则采样方法。图2b和图2c为根据调查目的的可选方案。图2b为调查商丘农田土壤动物长期固定样地内蚯蚓多样性的采样方案布点图, 常用的手拣法会对农田土壤产生强干扰, 也会对农作物带来破坏性影响, 故不宜采用高密度的空间样点布设方案, 当然在非作物生长季节可以根据实验目的适当增加采样点。图2c为采集不同体型土壤生物的空间样点布设方案。当同时采集大型(蚯蚓)、中小型(甲螨)、微型(线虫)土壤动物和土壤微生物时, 因为不同体型土壤动物的移动能力和空间自相关距离不同, 若采用图2a和图2b中的等间距空间样点布设方案, 便难以反映不同体型土壤动物的空间格局特征, 尤其是体型较小的微型土壤动物和土壤微生物, 故推荐采用兼顾不同体型土壤动物的镶嵌式采样方案(Bahram et al, 2015)。

农田土壤动物长期监测样地的调查监测需要较多的工作人员相互配合、协调工作, 为了保证调查过程、操作流程的规范性、标准性及调查结果的

图2 农田土壤动物大型固定样地采样方案。(a)农田土壤动物长期监测样地调查时的通用方案(白点代表以10 m为间隔的采样点, 红点代表以20 m为间隔的采样点); (b)在商丘市农田土壤动物大型固定样地调查蚯蚓的采样方案(红框和红点分别为蚯蚓采样区域和采样点); (c)在商丘市农田土壤动物大型固定样地调查中中型土壤动物(螨和跳虫)、小型土壤动物(线虫)和微生物的采样方案(红点、蓝点和黑点为采样点)

Fig. 2 Sampling plan in large permanent plot of agricultural soil animal. (a) shows the normal sampling plan in permanent plot of agricultural soil animal (the white dots represent sampling points spaced at 10 m intervals; the red dots represent sampling points spaced at 20 m intervals); (b) shows the sampling plan for earthworms in permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu City (red squares and red dots represent sampling areas and sampling points for earthworm); (c) shows the sampling plan for soil mesofauna (mite and springtail), soil microfauna (nematode) and microorganisms in permanent plot of agricultural animal in Shangqiu (red, blue and black dots represent sampling points).

精准性、严谨性, 需对调查人员进行系统的技术培训。野外调查监测的工作流程如下:

(1)将事先规划好的路径信息导入GPS或手机App, 寻找和定位设计好的农田土壤动物大型固定样地。将绘制的图件信息导入RTK, 根据设计的采样方案布点图放样, 精度控制在3–5 cm, 同时在每个采样点安置临时空间地标作为标记。

(2)根据调查方案采集样品。可使用土柱法、陷阱法采集中小型土壤动物, 手拣法、筛网法采集大型土壤动物, 陷阱法、诱捕法、吸虫器法等采集地表节肢动物。同时采集表2中列举的调查必要性为“必须”的指标, 可根据研究目的有选择地调查必要性为“可选”的指标。

完成调查取样后, 收集、整理并清点实验材料, 并务必将挖取的土坑填平, 最大限度地减少对农田样地的干扰和破坏。

3.3 室内分拣标本

在保证分离效率的前提下, 根据研究目的和类群特征采用规范的方法分拣标本。如采用Tullgren干漏斗法分离中型土壤动物标本, 湿漏斗法、蔗糖离心法等分离微型土壤动物标本, 手拣法分离大型

土壤动物标本。针对需进行DNA分析的土壤动物标本, 野外采集当天多使用分析纯酒精保存。对于体型较大的土壤动物(如蜘蛛、甲虫和蚂蚁), 因为其自身的含水量会稀释酒精从而影响DNA分析结果, 可在第二天更换为75%酒精保存。若后续样品用于同位素分析, 可将样品放入饱和食盐水中, 并置于–20℃冰箱保存备用。

4 标本鉴定保存、数据库建设和管理系统开发

4.1 标本的鉴定与描述

农田土壤动物长期监测样地的所有标本和数据, 都需要进行规范化、标准化和系统化管理。规范化地进行物种鉴定与信息描述, 包括样地编号、生物界门、纲、目、科、属和种名等信息。按拉丁语正规写法书写生物分类单位, 按双名法的格式书写种名, 描述界、门、纲、目、科、属和种的中文名信息, 规范填写物种描述相关信息数据表(附录5)并拍摄物种特征照片(图3)。这种规范化描述与管理有助于对大量数据进行规范存储、信息管理、长期保存和数据挖掘, 便于和国内外学者开展深度的交

图3 农田土壤动物长期监测样地内物种特征照片(以矮亚狼蛛和灰胸突鳃金龟为例)。(a)雄蛛背面观;(b)雌蛛背面观;(c)雄蛛触肢器生殖球腹面观;(d)雄蛛触肢器生殖球外侧观;(e)雄蛛触肢器腹面观;(f)雄蛛触肢器外侧观;(g)外雌器腹面观;(h)外雌器背面观。(A)头;(B)触角;(C)中胸腹突;(D)后足;(E)雄外生殖器背面观;(F)雄外生殖器侧面观。
Fig. 3 Species characteristic photos in permanent plot of agricultural soil animal (take *Lysania pygmaea* and *Melolontha incana* for example). (a) Male in dorsal view; (b) Female in dorsal view; (c) Male palp bulb in ventral view; (d) Male palp bulb in tetrolateral view; (e) Male palp in ventral view; (f) Male palp in retrolateral view; (g) Epigynum in ventral view; (h) Epigynum in retrolateral view. (A) Head in dorsal view; (B) Antennae; (C) Mesosternum process; (D) Hind leg; (E) Male genitalia in dorsal view; (F) Male genitalia in lateral view.

流合作。

4.2 标本的保存和保管

标本包括实物标本和电子标本。实物标本为野外采集的土壤动物标本实体, 依据不同类群的特征和研究目的采用多种形式保存, 如用玻片标本保存跳虫, 液浸标本保存蜘蛛, 针插标本保存甲虫等。保存时注意明确保存地点、保存单位、联系人等信息。

电子标本指以图片形式保存和保管的所有标本。包括物种特征照片(图3)、单个物种照片(附录6A)和群落内所有物种的照片(附录6B)等。电子标本可保存于采集单位, 也可保存于数据共享平台。需明确电子标本的保存规范, 包括完整标本的照片或图片、添加比例尺、标准化命名等, 同时需规范电子标本的存储格式和大小等基本信息。电子标本是农田土壤动物长期监测样地重要的标本保存形式, 可为土壤动物标本的数字化展示、数字化展馆建设、智能科普教育及基于人工智能的深度挖掘等提供重要信息。

4.3 数据库的建设与维护

中国农田土壤动物长期监测样地的调查监测会获取海量的多源异构数据资料, 需要建立规范的数据库进行统一存档管理, 便于后续的调用、查看、共享和深度挖掘等, 这是目前我国土壤动物数据科学管理与应用的现实需要, 也是我国土壤动物学服务农业持续发展和农田土壤健康的基本保障。建库流程包括软硬件准备工作、数据收集与整理、异构数据标准化、数据汇总与拼接、质量检查、数据库参数设置、数据入库、数据库运行和测试等。我国科学家正努力推动中国生物多样性大数据平台(马克平等, 2018)和农业生物多样性大数据平台(许哲平等, 2019)的建设工作, 中国农田土壤动物长期监测样地的数据库建设除了考虑土壤动物、农区生态环境的特征之外, 还要充分考虑与现有平台的对接和整合, 这将极大地发挥农田土壤动物数据库在科学研究、农业发展和社会经济领域的作用与价值。

数据库可以采用Geodatabase模型, 基于大型关系数据库SQLServer存储和管理土壤动物物种多样性数据, 以ArcSDE引擎为中间件进行空间数据库的操作; 建立时空动态GIS数据管理机制, 实现对土壤动物多样性历史库和现时库数据的动态统一

管理。在数据库中, 创建表单和数据图层。对数据库及其中的表单和图层进行参数设置, 包括数据的数学精度和属性字段长度、空间参考、数据库的存储空间等参数设置。依据ArcSDE+成熟商业数据库的空间数据管理技术, 将数据进行分析 and 分类, 进行数据库框架设计。通过ArcSDE空间数据引擎, 数据管理员和用户可与成熟商业数据库进行紧密连接, 实现数据有效、快速存取(图4)。

4.4 管理信息系统的研发

设计与研发农田土壤动物长期监测样地综合管理信息系统至关重要, 这个系统能够真实、准确、科学、高效地管理采集的数据, 实现对数据、人员、设施、调查活动的综合管理, 提高农田土壤动物长期监测样地建设的效率及监测数据资源的共享能力, 将成为深入挖掘农田土壤动物数据和解决农田面临问题的重要平台。

在符合数据库管理机制的基础上, 系统在C#环境下, 基于ArcGIS嵌入式开发组件ArcEngine开发, 采用Windows操作模式设计系统界面, 同时基于WebGIS进行网络发布以期实现远程访问开发管理系统, 实现不同级别的安全认证; 在Windows系统下, 基于WebGIS技术, 开发地图发布系统, 实现土壤动物多样性数据库的发布、浏览、查询、分析等功能。管理信息系统通过汇集、管理信息资源, 应用海量图形管理技术和地图引擎驱动技术, 为土壤

图4 农田土壤动物长期监测样地数据库框架

Fig. 4 Database framework for permanent plot of agricultural soil animal

图5 农田土壤动物管理信息系统的系统管理功能

Fig. 5 System management functions of agricultural soil animal management information system

动物多样性数据提供可视化、智能化的支持。主要功能包括系统管理、数据管理、数据服务、应用服务、工具服务等功能(图5)。

5 结语

土壤动物多样性的调查监测越来越受到研究人员、科研机构和相关单位的重视,为了应对国内外缺乏农田土壤动物长期监测样地和调查规范现状,本文提出了中国农田土壤动物长期监测样地的实施方案。该实施方案可以在我国几乎所有的农田生态系统实施和应用,可以有效调查几乎所有类群的农田土壤动物。基于该方案将有望建立规范化的我国农田土壤动物长期监测网络,将获取标准化、规范化、长期的海量数据资料,在数据库、管理信息系统、人工智能等现代技术的支撑下,我国农田土壤动物研究将有望率先进入数据科学时代;将为土壤动物学、农业生态学、土壤生态学研究提供重要的第一手资料,为解决我国农业重要科学问题和重大战略问题提供重要的数据支撑和决策依据。

致谢: 感谢中国科学院植物研究所马克平研究员提出的宝贵意见,感谢沈阳农业大学方红、西南大学张志升、河北大学张超和吉林大学王军老师以及中

国科学院东北地理与农业生态研究所刘冬研究员提供的图片资料,感谢西南大学段美春老师提供的文献资料。

ORCID

高梅香 <https://orcid.org/0000-0002-5841-9918>

杜嘉 <https://orcid.org/0000-0003-3590-6358>

吴东辉 <https://orcid.org/0000-0001-8778-0107>

参考文献

- Anderson-Teixeira KJ, Davies SJ, Bennett AC, Gonzalez-Akre EB, Muller-Landau HC, Wright SJ, Abu SK, Almeyda Zambrano AM, Alonso A, Baltzer JL, Basset Y, Bourg NA, Broadbent EN, Brockelman WY, Bunyavejchewin S, Burslem DFRP, Butt N, Cao M, Cardenas D, Chuyong GB, Clay K, Cordell S, Dattaraja HS, Deng XB, Detto M, Du XJ, Duque A, Erikson DL, Ewango CEN, Fischer GA, Fletcher C, Foster RB, Giardina CP, Gilbert GS, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Hargrove WW, Hart TB, Hau BCH, He FL, Hoffman FM, Howe RW, Hubbell SP, Inman-Narahari FM, Jansen PA, Jiang MX, Johnson DJ, Kanzaki M, Kassim AR, Kenfack D, Kibet S, Kinnaird MF, Korte L, Kral K, Kumar J, Larson AJ, Li YD, Li XK, Liu SR, Lum SKY, Lutz JA, Ma KP, Maddalena DM, Makana JR, Malhi Y, Marthews T, Mat Serudin R, McMahon SM, McShea WJ, Memiaghe HR, Mi XC, Mizuno T, Morecroft M, Myers JA, Novotny V, de Oliveira AA, Ong PS, Orwig DA, Ostertag R, den Ouden J, Parker GG, Phillips RP, Sack L, Sainge MN, Sang WG, Sri-Ngernyuan K, Sukumar R, Sun IF, Sungpalee W, Suresh HS, Tan S, Thomas SC,

- Thomas DW, Thompson J, Turner BL, Uriarte M, Valencia R, Vallejo MI, Vicentini A, Vrška T, Wang XH, Wang XG, Weiblen G, Wolf A, Xu H, Yap S, Zimmerman J (2015) CTFS-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21, 528–549.
- Bahram M, Kohout P, Anslan S, Harend H, Abarenkov K, Tedersoo L (2015) Stochastic distribution of small soil eukaryotes resulting from high dispersal and drift in a local environment. *The ISME Journal*, 10, 885–896.
- Bandeira FO, Alves PRL, Hennig TB, Schiehl A, Cardoso EJB, Baretta D (2020) Toxicity of imidacloprid to the earthworm *Eisenia andrei* and collembolan *Folsomia candida* in three contrasting tropical soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 1997–2007.
- Bardgett RD, van der Putten WH (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511.
- Beaumelle L, Thouvenot L, Hines J, Jochum M, Eisenhauer N, Phillips HRP (2021) Soil fauna diversity and chemical stressors: A review of knowledge gaps and roadmap for future research. *Ecography*, 44, 845–859.
- Condit R (1995) Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 18–22.
- Dennis P, Arndorfer M, Balázs K, Bailey D, Boller B, Bunce RGH, Centeri C, Orporaal A, Cuming D, Deconchat M, Dramstad W, Elyakime B, Falusi E, Fjellstad W, Fraser MD, Freyer B, Friedel JK, Geijzendorffer I, Jongman R, Kainz M, Marcos GM, Gomiero T, Grausgruber-Gröger S, Herzog F, Hofer G, Jeanneret P, Kelemen E, Kölliker R, Moakes SR, Nicholas P, Paoletti MG, Podmaniczky L, Pointereau P, Sarthou JP, Siebrecht N, Sommaggio D, Stoyanova SD, Teufelbauer N, Viaggi D, Vialatte A, Walter T, Widmer F, Wolfrum S (2009) Conceptual foundations for biodiversity indicator selection for organic and low-input farming systems. Indicators for biodiversity in organic and low-input farming systems. <https://cordis.europa.eu/project/id/227161/reporting>.
- Gao MX, Cheng SS, Ni JP, Lin L, Lu TY, Wu DH (2017) Negative spatial and coexistence patterns and species associations are uncommon for carrion beetles (Coleoptera: Silphidae) at a small scale. *European Journal of Soil Biology*, 83, 52–57.
- Gao MX, Guo YX, Liu J, Liu JW, Adl S, Wu DH, Lu TY (2021) Contrasting beta diversity of spiders, carabids, and ants at local and regional scales in a black soil region, Northeast China. *Soil Ecology Letters*, 3, 103–114.
- Gao MX, Sun X, Qiao ZH, Hou HY, Lu TY, Wu DH, Jin GZ (2018) Distinct patterns suggest that assembly processes differ for dominant arthropods in above-ground and below-ground ecosystems. *Pedobiologia*, 69, 17–28.
- Gao MX, Zhang C, Qiao ZH, Hou HY, Jin GZ, Lu TY, Wu DH (2018a) Metacommunity patterns of ground-beetle assemblages in two mixed broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests in the Xiao Xing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5636–5648. (in Chinese with English abstract) [高梅香, 张超, 乔志宏, 侯宏宇, 金光泽, 卢廷玉, 吴东辉 (2018a) 小兴安岭阔叶红松林地地表甲虫 Metacommunity格局. *生态学报*, 38, 5636–5648.]
- Gao MX, Zhu JY, Ni JP, Li JK, Lin L, Wu DH (2018b) Beta diversities of ground-beetle assemblages in two broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forests in Xiaoxing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 457–463. (in Chinese with English abstract) [高梅香, 朱纪元, 倪娟平, 李景科, 林琳, 吴东辉 (2018b) 小兴安岭阔叶红松林地地表甲虫Beta多样性. *生态学报*, 38, 457–463.]
- Geisen S, Wall DH, van der Putten WH (2019) Challenges and opportunities for soil biodiversity in the anthropocene. *Current Biology*, 29, R1036–R1044.
- Guo YX, Gao MX, Liu J, Zaitsev AS, Wu DH (2019) Disentangling the drivers of ground-dwelling macro-arthropod metacommunity structure at two different spatial scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 130, 55–62.
- Liu J, Gao MX, Ma YL, Sun X, Zhu XY, Adl S, Wu DH (2019) Spatial and environmental factors are minor structuring forces in a soil Collembola metacommunity in a maize agroecosystem. *Pedobiologia*, 76, 150572.
- Liu J, Gao MX, Wu DH (2017) Characteristics of ground-dwelling soil macro-arthropod communities in a biodiversity monitoring plot of black soil cropland, Northeastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3965–3975. (in Chinese with English abstract) [刘洁, 高梅香, 吴东辉 (2017) 基于黑土农田生物多样性监测样地的地表大型节肢动物群落特征. *应用生态学报*, 28, 3965–3975.]
- Ma KP (2008) Large scale permanent plots: Important platform for long term research on biodiversity in forest ecosystem. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 237. (in Chinese) [马克平 (2008) 大型固定样地: 森林生物多样性定位研究的平台. *植物生态学报*, 32, 237.]
- Ma KP (2011) Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 19, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2011) 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 19, 125–126.]
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: From CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. *生物多样性*, 23, 1–2.]
- Ma KP, Xu XH (2020) Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network well developed for community assembly studies. *Scientia Sinica Vitae*, 50, 359–361. (in Chinese) [马克平, 徐学红 (2020) 中国森林生物多样性监测网络有力支撑生物群落维持机制研究. *中国科学: 生命科学*, 50, 359–361.]
- Ma KP, Zhu M, Ji LQ, Ma JC, Guo QH, Ouyang ZY, Zhu L (2018) Establishing China infrastructure for big biodiversity data. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33,

- 838–845. (in Chinese with English abstract) [马克平, 朱敏, 纪力强, 马俊才, 郭庆华, 欧阳志云, 朱丽 (2018) 中国生物多样性大数据平台建设. 中国科学院院刊, 33, 838–845.]
- Marsden C, Martin-Chave A, Cortet J, Hedde M, Capowiez Y (2020) How agroforestry systems influence soil fauna and their functions—A review. *Plant and Soil*, 453, 29–44.
- Mcinga S, Muzangwa L, Janhi K, Mkeni PNS (2020) Conservation agriculture practices can improve earthworm species richness and abundance in the semi-arid climate of eastern cape, South Africa. *Agriculture*, 10, 1–12.
- Pan KW, Zhang L, Shao YH, Fu SL (2016) Thematic monitoring network of soil fauna diversity in China: Exploring the mystery of soils. *Biodiversity Science*, 24, 1234–1239. (in Chinese with English abstract) [潘开文, 张林, 邵元虎, 傅声雷 (2016) 中国土壤动物多样性监测: 探知土壤中的奥秘. 生物多样性, 24, 1234–1239.]
- Sun X, Li Q, Yao HF, Liu MQ, Wu DH, Zhu D, Zhu YG (2021) Soil fauna and soil health. *Acta Pedologica Sinica*, doi: 10.11766/trxb202012290717. (in Chinese with English abstract) [孙新, 李琪, 姚海凤, 刘满强, 吴东辉, 朱冬, 朱永官 (2021) 土壤动物与土壤健康. 土壤学报. doi: 10.11766/trxb202012290717.]
- Wan HW, Pan QM, Bai YF (2013) China grassland biodiversity monitoring network: Indicators and implementation plan. *Biodiversity Science*, 21, 639–650. (in Chinese with English abstract) [万宏伟, 潘庆民, 白永飞 (2013) 中国草地生物多样性监测网络的指标体系及实施方案. 生物多样性, 21, 639–650.]
- Xu H, Li YD, Lin MX, Wu JH, Luo TS, Zhou Z, Chen DX, Yang H, Li GJ, Liu SR (2015) Community characteristics of a 60 ha dynamics plot in the tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Biodiversity Science*, 23, 192–201. (in Chinese with English abstract) [许涵, 李意德, 林明献, 吴建辉, 骆士寿, 周璋, 陈德祥, 杨怀, 李广建, 刘世荣 (2015) 海南尖峰岭热带山地雨林60 ha动态监测样地群落结构特征. 生物多样性, 23, 192–201.]
- Xu ZP, Shao ZT, Zhu XJ, Wang F, Wang YY, Xiao M, Ma KP (2019) Big data portal development in agrobiodiversity: Current research and future outlooks. *Journal of Agricultural Big Data*, 1, 76–87. (in Chinese with English abstract) [许哲平, 邵曾婷, 朱学军, 王昉, 王媛媛, 肖曼, 马克平 (2019) 农业生物多样性大数据平台建设研究和展望. 农业大数据学报, 1, 76–87.]
- Zhang WX, Shen ZF, Shao YH, Shi LL, Liu SJ, Shi NN, Fu SL (2020) Soil biota and sustainable agriculture: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 3183–3206. (in Chinese with English abstract) [张卫信, 申智锋, 邵元虎, 时雷雷, 刘胜杰, 史楠楠, 傅声雷 (2020) 土壤生物与可持续农业研究进展. 生态学报, 40, 3183–3206.]

(责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(Box 1的英文对照)

Appendix 1 Scientific questions to be solved in permanent plot of agricultural soil animal (corresponding English for Box 1)
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-1.pdf>

附录2 农田土壤动物大型固定样地地面控制点的标记方法

Appendix 2 Marking methods of ground control points in large permanent plots of agricultural soil animal
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-2.pdf>

附录3 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的设计图

Appendix 3 Map of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu, Henan Province
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-3.pdf>

附录4 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的俯瞰图和近景图

Appendix 4 Aerial view and close shot picture of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-4.pdf>

附录5 土壤动物物种描述相关信息数据表

Appendix 5 Species description sheet of soil animal species
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-5.pdf>

附录6 农田土壤动物长期监测样地内物种和群落照片

Appendix 6 Photos of species and community in permanent plot of agricultural soil animal
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021265-6.pdf>

附录1 农田土壤动物长期监测样地拟解决的科学问题(Box 1的英文对照)

Appendix 1 Scientific questions to be solved in permanent plot of agricultural soil animal (corresponding English for Box 1)

Basic theory

I-1 What is the status of agricultural soil animal diversity in China? What are the characteristics of species, functional and genetic diversity of agricultural soil animal in China?

I-2 What are the temporal and spatial patterns of α , β and γ diversity of agricultural soil animal in China? What are the mechanisms that form and maintain these temporal and spatial patterns?

I-3 How does agricultural soil animal diversity interact with natural factor and human activity? Do the intense human activity in agriculture change the interaction between the soil animal diversity and the natural environment?

I-4 What are the temporal and spatial patterns of soil animal diversity in different agricultural areas in China? What are the factors and mechanisms that form and maintain the temporal and spatial patterns of soil animal diversity in different agricultural areas?

I-5 What is the relationship between soil animal diversity and the productivity and stability of agricultural ecosystem? What effect does soil animal diversity have on the productivity and stability of agricultural ecosystem?

I-6 What are the ecosystem functions of agricultural soil animal diversity? How does the ecosystem function of agricultural soil animal diversity dynamic change under the intense human activity?

I-7 What is the relationship between the soil animal and other taxa diversities (such as soil microorganism, vole, bird, pollinating insect, plant pest)? What are the internal connection and mechanisms between the cascading effect of soil animal and other taxa diversities and key ecosystem functions (such as crop yield, carbon sequestration)?

I-8 Under the background of global change, what is the matching degree of phenology between soil animal, crop, and other animals. What are the dynamic and mechanisms of the matching degree?

I-9 How has the diversity of soil animals changed during the history of agricultural development in China? Which species are sensitive to intense agricultural activities? Which species are adapted to intense agricultural activities?

I-10 What is the dynamic change in agriculture soil animal diversity in different agricultural areas in China? Which species and areas are the hot spots for protecting soil animal diversity?

I-11 Do human activities lead to the homogenization of agricultural soil animal diversity? Which agricultural areas have the most obvious homogenization? What are the countermeasures for the homogenization of agricultural soil animals from local to regional scale?

I-12 Under the current agricultural management model and possible future climate change scenarios, how will the diversity of agricultural soil animal change and response in China? How do agricultural soil animal change and response to different agricultural areas? How to efficiently monitor and predict the change and response?

I-13 What are the key ecosystem functions that soil animal diversity indicates the agricultural ecosystem health?

Practical application

II-1 Which practical activities can improve and maintain the diversity of agricultural soil animal? How to effectively help farmers and local relevant departments to improve and maintain the diversity of agricultural soil animal?

II-2 Which practical activities can maintain the stability, anti-interference and sustainability of agricultural soil animal diversity? How to help farmers and local relevant departments to maintain the stability, anti-interference and sustainability of the agricultural soil animal diversity?

II-3 Which practical activities can maintain and perform the functions of the agricultural soil animal diversity, such as maintaining high productivity, controlling pest, and maintaining ecological balance?

II-4 Which practical activities targeting on soil animal diversity can improve soil quality, maintain soil health and increase food production? How to achieve the mentioned goals through providing guidelines for practice activities?

II-5 What practical activities targeting on soil animal diversity can promote eco-agricultural tourism development, increase farmers' income and maintain rural stability?

附录2 农田土壤动物大型固定样地地面控制点的标记方法。(a)和(b)分别为德惠和商丘农田土壤动物大型固定样地中使用的水泥和灰桩标记方法。

Appendix 2 Marking methods of ground control points in large permanent plots of agricultural soil animal. (a) and (b) are marking methods of concrete and ash pile used in Dehui and Shangqiu large permanent plots of agricultural soil animal, respectively.

附录3 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的设计图。网格线上的黑点代表以5 m为间隔的采样点。
Appendix 3 Map of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu, Henan Province. The black dots on the grid line represent sampling points spaced at 5 m intervals.

高梅香, 刘启龙, 朱家祺, 赵博宇, 杜嘉, 吴东辉 (2022) 中国农田土壤动物长期监测样地科学调查监测的实施方法. 生物多样性, 30, 21265.
<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021265>

(a)

(b)

附录4 河南商丘9 ha农田土壤动物大型固定样地的俯瞰图(a)和近景图(b)。(b)中小红旗是临时地标。

Appendix 4 Aerial view (a) and close shot picture (b) of 9 ha large permanent plot of agricultural soil animal in Shangqiu. The small red flags in the picture (b) are temporary marks.

附录5 土壤动物物种描述相关信息数据表
Appendix 5 Species description sheet of soil animal species

名称 Name	描述 Description	名称 Name	描述 Description
物种序号 Species No.	物种的序号 Species No.	纬度 Latitude	物种采集地点的纬度 The latitude which the species were collected
样点编号 Site No.	采集样点的编号 Site No.	经度 Longitude	物种采集地点的经度 The longitude which the species were collected
样品编号 Sample No.	样品的编号 Sample No.	海拔 Altitude	物种采集地点的海拔 The altitude which the species were collected
生物界 Biological kingdom	物种所属界 The biological kingdom the species belonging to	物种优势度 Species dominance	物种的优势度 Species dominance
门 Phylum	物种所属门 The phylum the species belonging to	土地利用类型 Land use type	物种采集地点的土地利用类型 The land use type which the species were collected
纲 Class	物种所属纲 The class the species belonging to	土壤类型 Soil type	物种采集地点的土壤类型 The soil type which the species were collected
目 Order	物种所属目 The order the species belonging to	农作物种类 Types of crop and vegetable	物种采集地点的农作物种类 The crop type which the species were collected
科名称 Family	物种所属科 The family the species belonging to	保存单位 Preservation unit	保存物种标本的单位 The organization where the samples are kept
属名 Genus	物种所属属 The genus the species belonging to	标本采集人 Specimen collector	标本的主要采集人 The main collector of the specimen
种名 Species name	物种的种名 Species name	采集日期 Collection date	标本采集日期 Specimen collection date
中文名称 Chinese name	物种的中文名 Chinese name of the species	鉴定人 Appraiser	标本鉴定人 Specimen appraiser
国家 Country	物种采集点所在的国家 The country which the species were collected	鉴定时间 Identification time	标本鉴定时间 Specimen identification time
省份 Province	物种采集点所在的省份 The province which the species were collected	联系人 Contact	对物种标本负责的联系人 The contact responsible for the specimen
县市 County and city	物种采集点所在的县市 The county and/or city which the species were collected	地址 Address	联系人的通讯地址 Correspondence address of the contact

附录6 农田土壤动物长期监测样地内物种和群落照片。A和B分别表示物种和群落照片。A中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别为甲虫(灰胸突鳃金龟 *Melolontha incana*)、甲螨(中华端三甲螨 *Acrotritia sinensis*)、蓟马(齿呆蓟 *Anaphothrips dentatus*)、蚂蚁(日本弓背蚁 *Camponotus japonicus*)和蜘蛛(日斯坦蛛 *Stemmops nipponicus*)的物种照片; B中(A)、(B)、(C)分别为甲虫、甲螨和蓟马群落照片, (A)、(B)、(C)中的数字表示该群落中每只动物的序号。

Appendix 6 Photos of species and community in permanent plot of agricultural soil animal. A and B are photos of species and community, respectively. (a), (b), (c), (d) and (e) within A part are species photos of beetle (*Melolontha incana*), oribatid mite (*Acrotritia sinensis*), thrip (*Anaphothrips dentatus*), ant (*Camponotus japonicus*) and spider (*Stemmops nipponicus*). (A), (B) and (C) within B part are photos of beetle, oribatid mite and thrip communities. The numbers labeled in (A), (B) and (C) within B part represent animal's orders.