技术与方法

外来入侵昆虫数字化野外调查平台构建与应用*

陈 宏[1**] 冼晓青[2**] 谢 骞[1] 张桂芬[2] 刘万学[2] 赵 健[1***]

（1. 福建省农业科学院数字农业研究所，福州 350003；2. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室，北京 100193）

摘 要 **【目的】** 实现外来入侵昆虫野外调查信息的一体化、规范化采集，提高调查数据质量和效率，为外来入侵昆虫研究和防控提供科学、精准的数据支撑。**【方法】** 综合运用地理信息系统、移动开发以及时空数据可视化等技术手段，研发由野外调查 APP 和调查数据管理系统构成的外来入侵昆虫数字化野外调查平台，构建完善的外来入侵昆虫野外调查数字化集成解决方案。**【结果】** 平台具备调查规划、调查任务协作、调查数据采集、标本标签化管理和调查数据时空可视化等功能，实现入侵昆虫野外调查全过程数字化管理。2017-2020 年，该平台在全国番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 发生分布调查中得以应用，调查涉及 11 个省区共采集番茄潜叶蛾发生点数据 706 条。**【结论】** 平台的构建与应用能够有效解决外来入侵昆虫调查组织与实施的数字化管理问题，提高外业调查和内业数据处理、分析的效率，增强各类型调查数据之间的关联，扩展数据应用与分析的尺度。本研究提出的技术方案为外来入侵物种调查与数据应用提供重要参考。

关键词 入侵昆虫；调查平台；调查规划；标本管理；时空可视化；番茄潜叶蛾

Construction and application of a digital field investigation platform for invasive alien insects

CHEN Hong[1**] XIAN Xiao-Qing[2**] XIE Qian[1] ZHANG Gui-Fen[2] LIU Wan-Xue[2] ZHAO Jian[1***]

(1. Institute of Digital Agriculture Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract **[Objectives]** To promote the integration and standardization of the collection of field data on invasive insects, improve the quality and efficiency of data collection, and provide scientific support for research on the prevention and control of these pests. **[Methods]** The digital field investigation platform for invasive alien insects is comprised of a field investigation APP and data management system and was developed using a geographic information system, mobile development, spatiotemporal data visualization, and other technical methods. The result is an integrated, digital, solution for investigating invasive insects in the field. **[Results]** The platform has multiple functions, including investigation planning, task collaboration, data collection, specimen labeling, and the spatiotemporal visualization of data to realize the digital management of the whole process of field investigation. The platform was used to investigate the occurrence and distribution of *Tuta absoluta* nationwide from 2017 to 2020. This investigation contained a total of 706 records on the occurrence and distribution of *T. absoluta* in 11 provinces. **[Conclusion]** The development of a digital field investigation platform has effectively solved the problem of the digital management of data on invasive alien insects, thereby improving the efficiency of

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2021YFC2600400，2017YFC1200600）；“5511”协同创新工程（XTCXGC2021015）；福建省农科院科技创新团队建设（CXTD2021012-3）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：chenhong@faas.cn；xianxiaoqing1981@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhaojian@fass.cn

收稿日期 Received：2022-11-28；接受日期 Accepted：2022-12-18

field investigation and data analysis. The platform also enhances the integration of various types of data, thereby expanding the scope of data analysis, making it a valuable tool for investigating invasive insects in the field.

Key words　invasive alien insects; investigation platform; investigation planning; specimen management; spatio-temporal visualization; *Tuta absoluta*

生物入侵是关乎国家生物安全的重大问题。我国是世界上遭受外来入侵物种危害最严重的国家之一。目前，在我国已发现的 660 多种外来入侵物种中入侵昆虫数量约 140 余种。近 20 年来，我国平均每年以入侵昆虫为主的新发疫情 5-7 种，是 20 世纪 90 年代的 10 倍（郭建洋等，2019）。入侵昆虫具有强大的繁殖、扩散和适应能力，极易在入侵地造成巨大的经济和生态损失（齐国君和吕利华，2018）。因此，加强对外来入侵昆虫的预警监测及防控是我国当前重大的国家战略需求（万方浩等, 2011）。

野外调查是外来入侵昆虫预警监测的重要手段。近十几年来，全国各地持续开展了各类外来入侵昆虫调查，获取了大量详细的生物学、生态学和空间分布等数据，为开展外来入侵昆虫研究与防控提供了重要的数据支撑。同时，信息化技术手段的应用，新的调查装备、方法和模式也应运而生，提高了调查工作的效率（陈宏等, 2021）。但是，随着全球贸易往来的日益密切，入侵昆虫的扩散速度越来越快，扩散途径也更加复杂，特别是重大、新发和潜在入侵昆虫对我国农林生产和生态安全构成的威胁日益严重。仅仅依靠信息技术实现简单的调查点空间定位和纸笔记录的数字化转换已无法满足当前快速发展的外来入侵昆虫调查监测的需要。首先，目前野外调查缺乏系统性的规划统筹，一般在预设的区域范围、调查路线上采用随机或者等间隔调查采样的方式，调查的随机性较强；其次，数据采集和管理体系不统一，调查工作需要多种软件配合协作。数据在不同软件之间传递、转换，容易造成数据丢失且不利于数据的融合应用；再次，调查人员独立开展工作，针对大范围复杂环境下的调查工作难以协作。更重要的是，标本采集、鉴定与系统化管理是入侵昆虫调查的重要工作，但是标本通常需要在专业人员鉴定后才能确认具体的物种名称。而标本物种信息与调查点空间分布信息属于强关联关系。专业人员鉴定工作的滞后性容易导致标本采集地的空间属性与标本的物种属性难以及时更新和管理，造成大量调查数据中标本属性缺失，或者标本数据中采集点属性缺失，导致数据质量无法满足研究和应用的要求。

因此，科学制定调查计划和布设调查点，将调查任务及时分配给调查人员，才能保证调查人员之间高效的协作；在野外复杂环境下能够快速简便地记录昆虫标本数据；昆虫标本鉴定后能及时地与调查点空间数据进行关联；物种调查全过程管理能够在统一平台下完成。这些需求能否满足将直接关系到调查的工作效率和数据成果的准确性。针对上述需求，本研究提出了外来入侵昆虫数字化野外调查平台的构建方案，运用 3S、条码标签、云平台和时空可视化等数字化技术手段，实现调查全过程集成化应用，以期为外来入侵昆虫野外调查提供一体化、数字化集成管理工具平台。

1　材料与方法

1.1　平台设计

1.1.1　平台框架　外来入侵昆虫数字化野外调查平台采用 5 层架构：交互层、业务层、服务层、云存储层和硬件层，平台框架各层的具体内容如图 1 所示。其中，交互层呈现具体的调查数据采集、分析和管理等功能，负责人与软件平台的交互；业务层是对平台功能的抽样化，提高了平台模块化集成水平和运行效率；服务层提供野外调查 APP 和调查数据管理系统之间的数据传输接口，以及跨平台之间的地图数据服务和气象数据服务接口；云存储层通过云平台技术实现数据库、文本、图片等异构调查数据的统一管理，保

证数据安全；硬件层涉及平台的数据采集装备和运行设施，是平台运行的硬件基础。同时，外来入侵昆虫调查数据规范是调查成果准确性、规范性和科学性的重要保障，良好的平台运维管理和安全保障体系也是平台稳定运行的重要支撑。

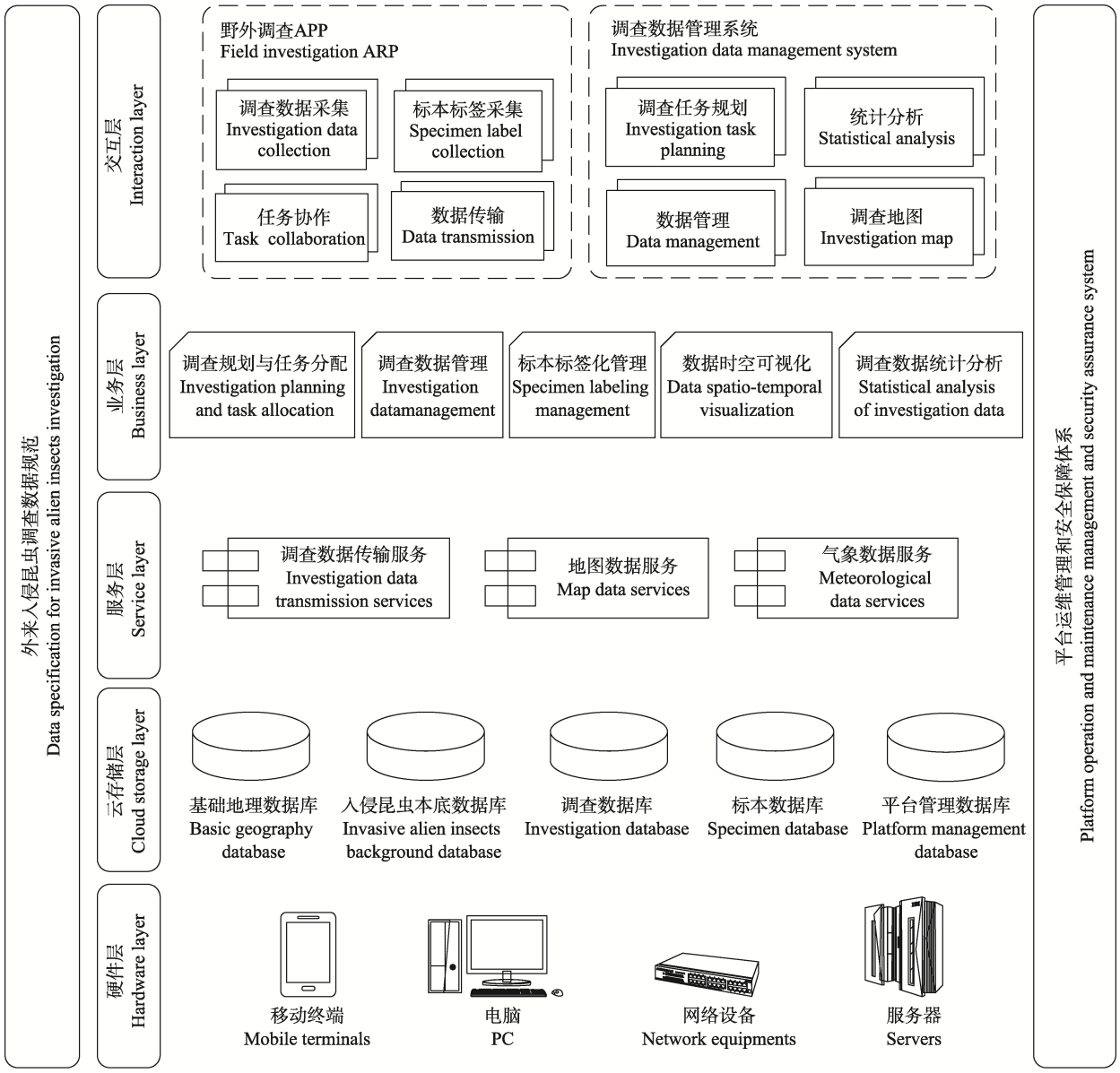


图 1　外来入侵昆虫数字化野外调查平台框架

Fig. 1　The digital platform framework for field investigation of invasive alien insects

1.1.2　调查技术流程　外来入侵昆虫野外调查包括 3 个阶段：调查筹备阶段、外业调查阶段和内业鉴定分析阶段（图 2）。调查筹备阶段，调查组织者运用调查数据管理系统制定调查计划，明确调查点布设、任务分工和调查路径等细节，形成调查任务数据，并通过管理系统将任务数据分发至每位调查人员的野外调查 APP。外业调查阶段，调查人员根据分配任务，开展实地调查工作，采集各类调查数据，收集昆虫标本并为其附上条码标签。完成调查后及时将数据上传至云端服务器，将标本寄往鉴定专家或机构。在调查过程中，调查人员还可以通过调查 APP 及时向队友反馈调查进度和调查任务的完成情况。内业鉴定分析阶段，平台管理人员对上传的调查数据

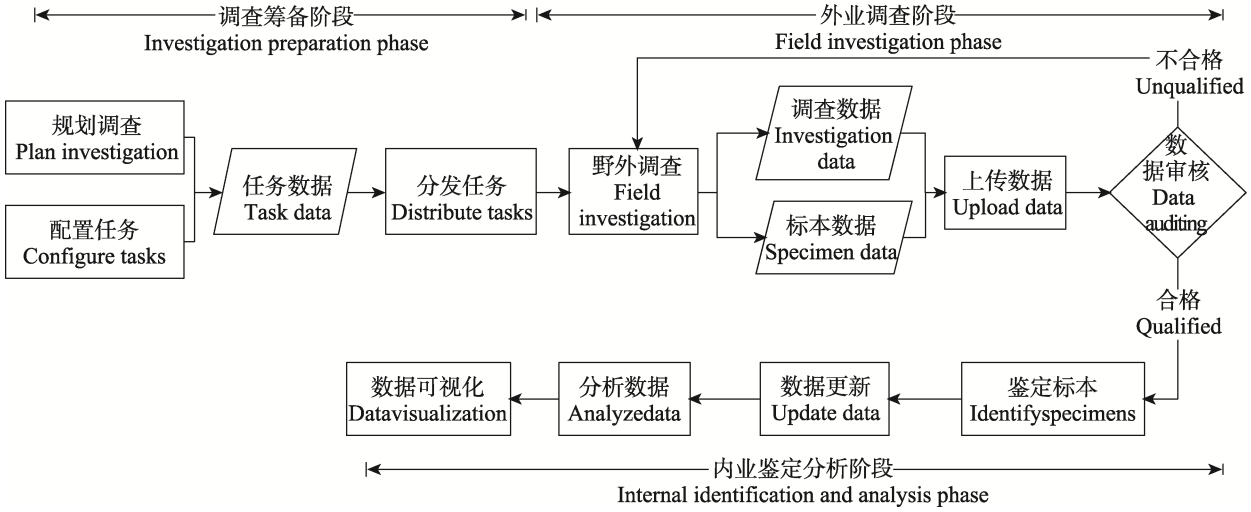


图 2　外来入侵昆虫数字化野外调查技术流程

Fig. 2　The technology process of digital field investigation for invasive alien insects

进行审核，如果数据未能达到标准要求，则将数据退回给调查人员，要求重新调查；标本鉴定人员完成物种鉴定后通过扫描条码标签快速调取、更新标本的鉴定信息；数据分析人员对更新后的调查数据进行统计分析，使数据满足时空可视化的要求。

1.1.3　平台功能结构　外来入侵昆虫数字化野外调查平台由野外调查 APP 和调查数据管理系统组成，平台功能结构如图 3 所示。野外调查 APP 是外业调查的工具软件，依托移动智能终端运行，实现调查任务协作、数据采集和传输等功能。调查数据管理系统作为整个调查工作的统筹中枢，负责调查人员、任务以及数据的管理、分析和可视化。

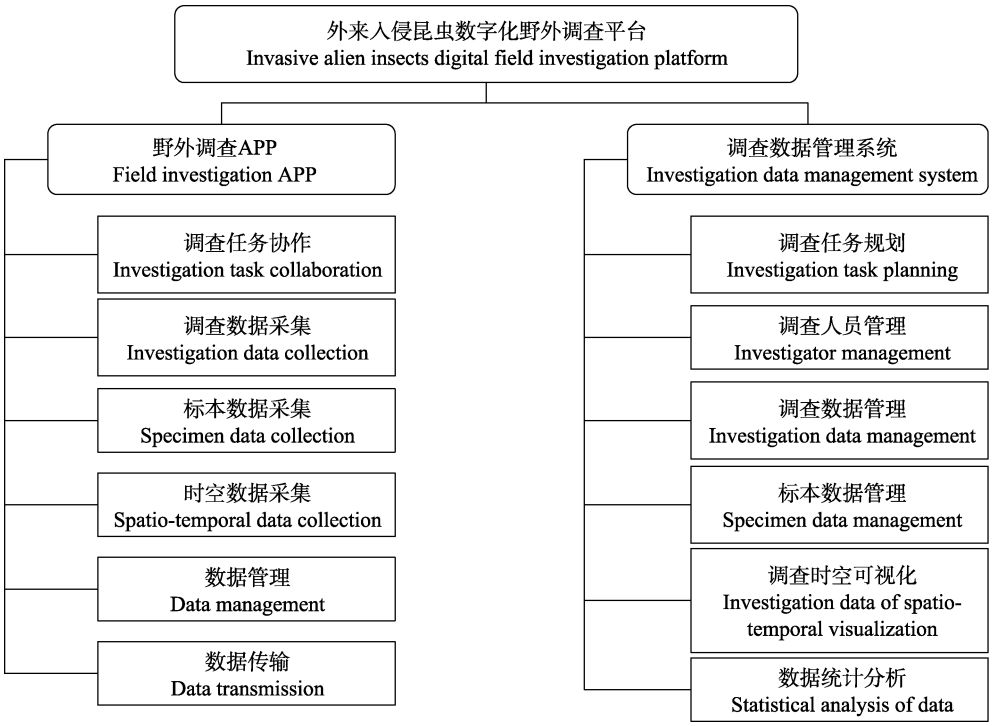


图 3　外来入侵昆虫数字化野外调查平台功能结构

Fig. 3　The functional structure of digital field investigation platform for invasive alien insects

1.2 关键技术方法

1.2.1 开发技术及部署环境 平台开发技术和运行维护需要的环境如表 1 所示。

1.2.2 标本标签化管理 平台运用条形码实现标本的标签化管理，技术流程如图 4 所示。为便于不同形状的昆虫标本采集器赋码后的条码信息扫描，标本标签同时采用一维码和二维码两种条码。其中，二维码是以二维方式表示信息，是建立在图像模式识别、光电技术和信息编码基础上的自动识别技术（文斌等, 2014）。平台标本标签编码采用全局唯一标识符（Globally unique

表 1 外来入侵昆虫数字化野外调查平台的开发技术和部署环境

Table 1 The development technology and deployment environment of digital investigation platform for invasive alien insects

类别 Type	内容 Item	开发技术及部署环境 Development technology and deployment environment
调查 APP 开发技术 Investigation APP development technology	开发架构 Development framework	Flutter
	开发语言 Development languages	Dart
	开发工具 Development tools	Visual Studio Code
管理系统开发技术 Management system development technology	开发架构 Development framework	.NET
	开发语言 Development languages	C#、JavaScript
	开发工具 Development tools	Visual Studio Code
	时空可视化组件 Spatio-temporal visualization components	Turf、Leaflet
	地图资源服务 Map resources service	Tianditu Map
部署环境 Deployment environment	服务器系统 Server system	Windows Server 2012
	Web 服务系统 Web service system	IIS8.0
	关系型数据库 Relational databases	SQL Server 2012
	调查 APP 运行系统 Investigation APP operation system	Android
	管理系统访问浏览器 Management system view browser	Chrome

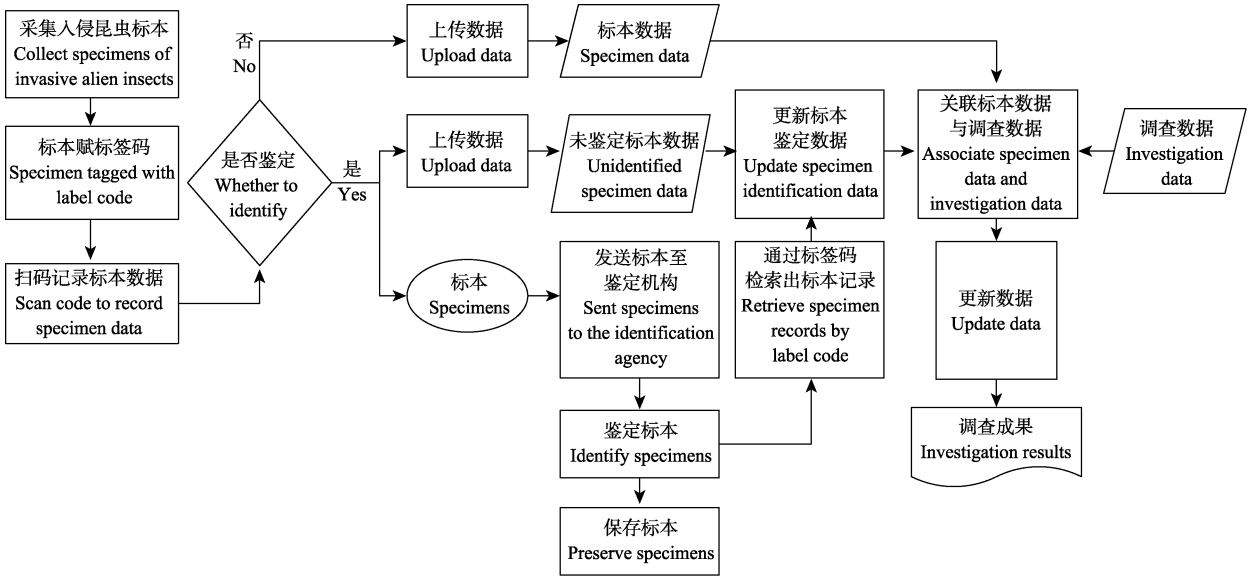


图 4 外来入侵昆虫标本标签化管理流程

Fig. 4 The management process of specimen labeling for invasive alien insects

identifier, GUID），以保证标本编码的唯一性。在野外调查中，先对采集的昆虫标本赋码并使用野外调查 APP 记录标本数据，然后将需要鉴定的标本寄往鉴定专家或机构，待标本鉴定完成后，鉴定人员通过标本标签码快速检索出标本信息，完成标本相关数据更新以及与调查数据的关联。无需鉴定的标本数据则通过野外调查 APP 上传至云端服务器，实现与调查数据的关联。标本标签码在标本管理中既是标本的管理凭证，也是标本数据与调查数据关联的信息传递媒介。

由于野外环境的特殊性和标本运输过程中可能产生碰撞，容易造成标本标签码损坏，给后续的数据应用带来困难。因此，本研究采用 PET 防水不干胶标签纸制作标本二维码标签，以保证使用过程中二维码的完整性。标本标签样式如图 5 所示。

图 5　外来入侵昆虫标本标签样式范例
Fig. 5　Examples of labeling style for specimens of invasive alien insects

1.2.3　时空数据可视化　外来入侵昆虫的分布和扩散具有显著的时空特征。时空属性是外来入侵昆虫调查的重要数据成果之一，本研究根据入侵昆虫发生分布的时空相关性，研发调查数据时空可视化模型，运用 Turf 开源 GIS 引擎组件库实现在线空间分析功能（Turf, 2022），借助 Leaflet 开源地图组件库实现数据的空间可视化展示和地图交互操作（Leaflet, 2022），使用 Geojson 数据格式作为空间数据的交互格式（Butler *et al*., 2016）。调查数据的时空可视化涉及调查点、调查路径、标本采样点、调查人员等点状和线状要素。在样式搭配上，选择与数据主题搭配的图标和配色。

平台核心时空数据可视化模块采用空间点聚合算法实现海量调查点的空间展示，首先把地图视图划分为多个空间网格，然后将调查点分配到不同的网格中，根据每个网格内调查点分布计算网格质心，以此作为聚类的中心。此外，为了避免临近网格质心的覆盖，还要对网格聚类中心进行合并处理，具体做法是以一个网格质心为中心，以一定的半径作为搜索范围，将在这个范围内的网格质心都进行合并。每个聚类中心单独显示其所包含的调查点数量。一旦空间视图范围发生变化，平台将重新进行一次空间点聚合分析。

1.2.4　移动开发技术　移动开发是指以手机、PDA 等便携终端为基础，进行相应的移动应用开发工作。目前主流的移动开发技术可以分为 Native APP（原生应用）、Hybrid APP（混合应用）和 Web APP（网页应用）。相对于 Native APP 和 Web APP 的开发，Hybrid APP 开发克服了 Native APP 代码可移植性差以及 Web APP 无法调用与设备相关功能的缺点，同时兼具 Native App 功能运行性能高及 Web App 开发入门门槛低、平台无关性的优点，是实现移动应用开发维护降本增效的一种有效的途径（许佩莹等, 2018）。本研究移动端 APP 的开发采用 Flutter 开发框架，在 Flutter 框架中完成 APP 功能开发后将其编译为 Android 平台的 APK 安装包。Flutter 是 Google 开源的应用开发框架，仅通过一套代码库，即可构建、测试和发布适用于移动端、Web 端、桌面和嵌入式平台的精美应用（Google, 2022）。

1.2.5　外来入侵昆虫调查数据空间匹配　外来入侵昆虫调查数据分为空间数据、文本数据和图片文件数据等类型。为了提高数据存储与读取效率，平台针对各类数据采用对应的存储方式，其中，空间数据采用 SQL Server 数据库的 Geography 空间数据类型进行存储；文本数据采用关系型数据库表单进行存储；图片文件数据采用云端服务器磁盘空间进行存储。在数据管理上，平台构建了一套统一的编码体系，每条调查记录上传至云端服务器后都将被平台赋予一个全局唯一的 ID。在后续的数据处理、分析和运

用中，平台通过 ID 关联实现空间数据、文本数据和图片文件数据的匹配。

1.2.6 调查数据动态更新管理 平台引入时间戳的概念用于调查数据动态更新管理，管理流程如图 6 所示。当调查数据从终端设备上传至云端服务器后，将被赋予数据更新时间戳；当调查数据通过审核后再被赋予审核时间戳。任何对数据的更新操作都会导致数据更新时间戳的改变。同时，数据的审核时间戳将失效，数据需要重新审核。此外，平台还建立了完善的数据更新日志机制，详细记录每条数据的更新及审核操作，保证数据的安全和追踪管理。

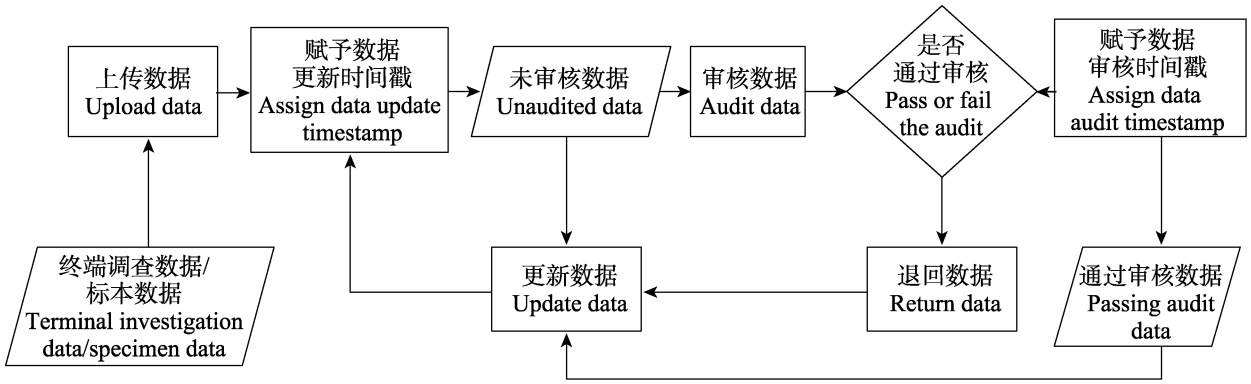


图 6 调查数据动态更新管理流程

Fig. 6 Investigation data dynamic update management process

2 结果与分析

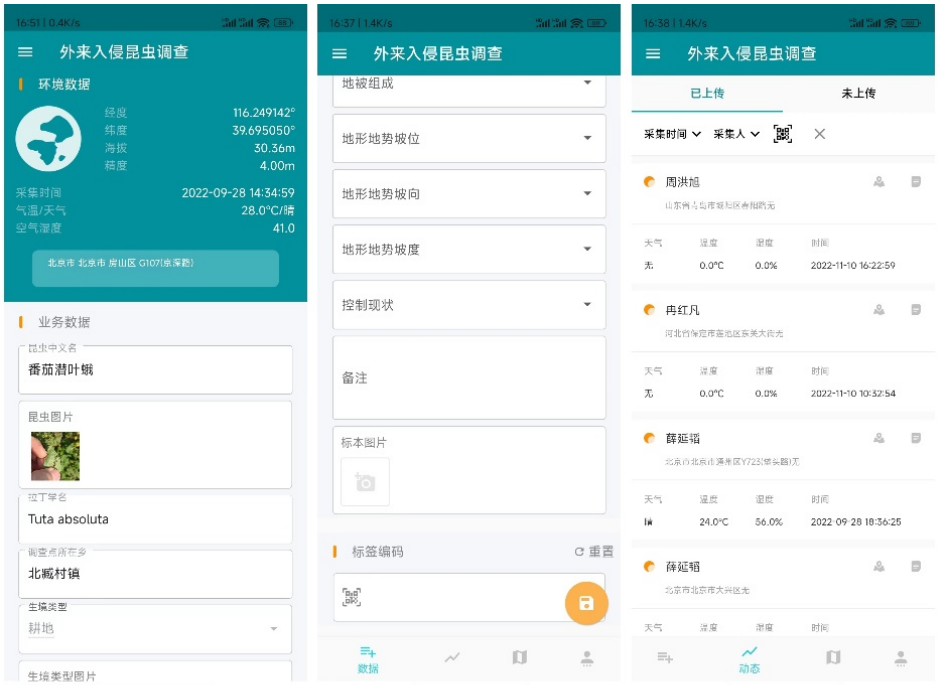
2.1 调查 APP 功能实现

外来入侵昆虫野外调查 APP 中数据采集和管理界面采用列表结合标签的自适应布局，以便界面适应不同设备的屏幕分辨率。界面整体由上段标题栏、中段功能模块和下段功能切换标签组成，下段功能切换标签包括数据、动态、地图、设置 4 个功能模块。APP 界面设计使用简约的扁平化风格，总体界面采用蓝绿色调，图标选择与操作主题切合的样式，便于不同调查人员快速上手 APP 的操作。

在数据模块的输入交互设计上，综合考虑野外环境和条件的复杂性，运用多种技术方法，简化数据输入的操作。根据外来入侵昆虫调查数据采集规范，对于描述性的文本数据，拆分为多个选项并通过单选或多选的方式完成数据输入；对于数值类型数据，通过正则表达式对输入数据的格式进行约束，保证调查数据的规范性；对于调查点经纬度、时间、天气和地址等数据，通过调取设备定位模块和外部数据服务接口，自动获取数据；对于标本标签，通过调用设备摄像头模块，采用图像识别模式完成标签数据的读取。在动态模块中，以列表方式列出同一任务已采集的调查数据，调查人员可以修改自己或浏览他人的调查数据，相互评价与交流工作，及时了解任务整体的调查进度；标本鉴定人员可以点击条码按钮，调用设备摄像头扫描标本标签，快速检索出标本对应的调查数据。在地图模块中，调查人员可以通过地图界面浏览当前任务中调查点的空间分布。外来入侵昆虫野外调查 APP 主要功能界面如图 7 所示。

2.2 调查数据管理系统功能实现

调查数据管理系统采用经典的信息管理系统（Management information system, MIS）页面风格，系统保持一致的人机界面，让系统使用人员始终用同一种方式进行数据操作。系统界面采用三列布局，左列是功能模块列表，中列是功能操作区域，右列是详细数据列，一般情况下为隐藏状态。功能列表包括调查任务、数据地图和调查数据，通过点击左侧的功能模块实现不同模块



a. 调查数据采集
Investigation data collection

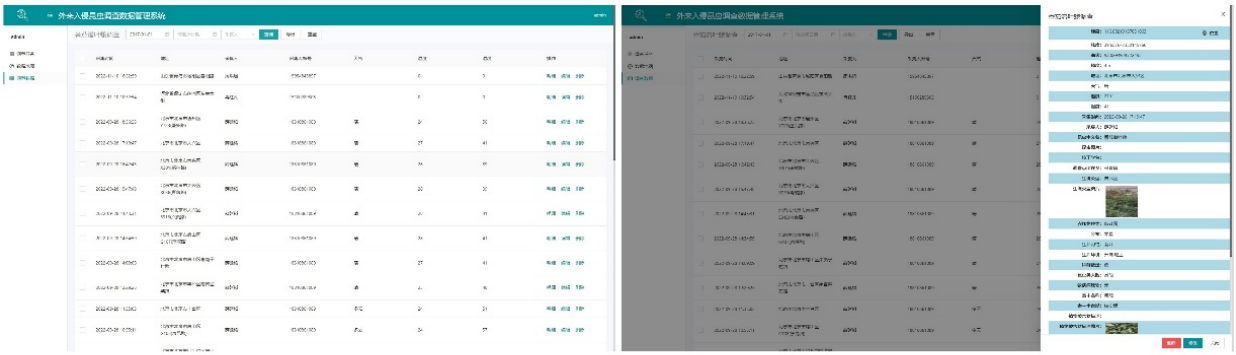
b. 标本数据采集
Specimen data collection

c. 数据管理
Data management

图 7　外来入侵昆虫数字化野外调查 APP 主要功能界面

Fig. 7　The main function interface of digital field investigation APP for invasive alien insects

间的切换。调查任务模块采用地图交互方式选取调查点，调查任务组织者可以通过遥感背景底图了解拟调查区域的地理、环境、交通和行政区划等概况。在地图中单击计划调查的地点，系统将弹出调查点规划页面，组织者可选择任务和调查人员。当完成所有调查点的规划后，可以通过系统将调查任务及调查点发送给调查人员。数据地图模块和调查数据模块实现对调查数据的查询、浏览和修改功能。数据地图模块能够实现在地图中查询和浏览调查点的分布，而调查数据模块则采用数据列表方式对数据进行查询和浏览。在数据地图页面点击调查点，或者在调查数据页面点击数据操作按钮，系统都会在页面右侧弹出数据的详细信息。系统使用人员可根据配置的权限对数据进行修改或删除。调查数据管理系统主要功能页面如图 8 所示。



a. 调查数据管理
Investigation data management

b. 调查数据详细信息
Investigation data details

图 8　外来入侵昆虫调查数据管理系统主要功能页面

Fig. 8　The main function interface of investigation data management system for invasive alien insects

2.3 平台应用与调查组织管理

在国家重点研发计划项目资助下，外来入侵昆虫数字化野外调查平台在全国番茄潜叶蛾发生分布调查中得以应用。为提高调查工作的组织效率，在国家重点研发计划项目组统筹下成立了调查管理组、数据审核组、标本鉴定组、调查实施组和平台运维组。调查管理组由项目首席专家及各课题责任专家组成，负责调查总体规划、制定数据规范和组织管理。数据审核组由项目参加单位抽调人员组成，负责调查数据的审核、修订。标本鉴定组由行业资深专家组成，负责收集标本的鉴定工作。调查实施组由项目参加单位人员组成，负责具体的外业调查工作，调查管理组根据项目参与单位驻地进行区域划分和调查任务分配。平台运维组由平台软件开发人员构成，负责调查软件系统的日常维护，及时修复反馈的漏洞。在调查启动前，调查管理组开展了培训工作，内容包括物种识别、调查软件操作、调查技术要求、标本采集要求等。此外，调查管理组还建立了调查微信工作群，以便各小组及时沟通进展，反馈调查中的问题。2017-2020 年，8 家项目参加单位的 72 名调查人员使用野外调查 APP 开展番茄潜叶蛾分布调查（表 2）。

2.4 平台应用结果分析

2017-2020 年，运用外来入侵昆虫数字化野外调查平台开展的番茄潜叶蛾分布调查，调查区域覆盖北京及新疆等 11 个省（市、自治区），63 个地级市，191 个区县，累计采集番茄潜叶蛾发生分布数据 706 条，调查数据统计如表 2 所示。结果显示，近年来番茄潜叶蛾由西北和西南边境省区分别向内陆地区扩散，给我国番茄主要种植区域的番茄生产造成严重的经济损失或构成潜在威胁；此外，信息技术的应用能够有效提高调查工作效率，让跨区域跨单位的协作调查得以实施。

表 2 番茄潜叶蛾调查数据统计

Table 2 Statistics of *Tuta absoluta* investigation

年份 Year	调查省份 Investigation provinces	边境省份数量 Number of border provinces	内陆省份数量 Number of inland provinces	调查月份 Month of investigation	调查天数（d） Number of investigation days (d)	调查点数量（个） Number of investigation points (point)
2017	新疆 Xinjiang	1	0	8-9	10	81
2018	北京 Beijing, 广西 Guangxi, 贵州 Guizhou, 河北 Hebei, 湖南 Hunan, 江西 Jiangxi, 四川 Sichuan, 新疆 Xinjiang, 云南 Yunnan, 重庆 Chongqing	3	7	3-12	68	562
2019	北京 Beijing, 贵州 Guizhou, 山东 Shandong, 新疆 Xinjiang, 云南 Yunnan	2	3	1-4, 8-10	15	32
2020	四川 Sichuan, 新疆 Xinjiang 重庆 Chongqing	1	2	6-7	6	31

3　结论与讨论

目前，大多数外来入侵昆虫调查工作还是依靠传统的纸质记录，即使通过 GPS 终端、照相机等设备采集调查点经纬度及图片等数据，但是获取的数据相互独立，数据间的关联性不强，数据内业整理、分析存在诸多不便（林兴华等, 2021; 罗义灿等, 2021; 汪分等, 2022）。移动智能应用、云平台、地理信息系统、图像识别及大数据等数字化技术的发展，为外来入侵昆虫预警监测提供了技术支撑（张凯等, 2022）。本研究针对外来入侵昆虫野外调查的工作需求，运用数字化技术构建了野外调查平台，为外来入侵昆虫野外调查提供了信息化工具软件，依托智能移动终端强大的数据获取能力，实现入侵昆虫发生分布、图片、生物生态学等多源异构数据的一体化采集和无纸化管理，构建了从调查规划、调查实施到标本管理全过程电子化数据台账，解决了入侵昆虫野外调查在不同环节、不同人员、不同数据类型、不同调查区域、不同调查对象之间的数据紧密关联和统一高效管理的问题，满足跨部门、跨区域、跨行业外来入侵昆虫协作调查的需要。平台在全国番茄潜叶蛾调查工作中的应用效果证明，通过数字化技术构建的移动调查软件和数据管理平台能够显著提升外来入侵昆虫野外调查工作效率，为野外调查工作带来极大的便利性。同时，数字化野外调查平台和应用模式也为外来入侵物种以及其他野外调查工作提供了参考。

入侵昆虫野外调查不仅是物种发生分布、生物生态学数据的采集、汇总和分析，调查规划和标本管理同样是调查工作不可分割的部分，前期的调查规划和后期的标本管理也将影响调查数据成果。有些调查工作前缺乏详细规划，调查点、标本采集点的空间分布较为随机，影响了调查数据的典型性和科学性（全金成等, 2019）。虽然在外来入侵物种调查规划的技术方法（陈宏等, 2018）、调查数据采集与管理（陈宏等, 2021; 邱荣洲等, 2021）、标本信息化管理（王玉香和张喜红, 2018）等已有相关技术方案，但是各环节采用的技术和软件平台相对独立，操作繁琐，易用性低，数据频繁在不同软件之间传递、转换容易造成误差，影响调查成果质量。本研究借鉴已有技术方案，结合外来入侵昆虫野外调查实际需要，设计了野外调查、标本管理、数据更新等业务流程，将调查规划、数据采集、标本管理和数据应用等功能集成在一个工作平台中，让调查组织者、调查人员和标本鉴定人员在统一的平台中就可以完成所有的工作，实现外来入侵昆虫调查的数字化高效集成管理。

虽然软件平台能够有效提高外业调查和内业数据处理的效率，但是软件的应用成效仍然受到人员操作熟练程度、运行维护管理、网络环境及硬件条件等因素的影响。因此，制定完善的运维保障机制、调查组织管理机制和调查数据质量审核机制，加强人员技术培训，提供安全、稳定的网络硬件环境是调查平台高效运行的重要基础。同时，随着我国商品贸易和人员往来日益频繁，外来入侵昆虫的传入与扩散风险也逐渐增加。这对外来入侵昆虫监测预警的时效性、准确性提出了更高的要求。目前，调查平台的数据审核仍需要大量的人工投入，严重影响了平台运行效率。在今后的研究中，我们将着力于运用人工智能、大数据、图像识别等技术，实现入侵昆虫野外智能鉴定，提高数据审核的效率。此外，通过物联网、无人机、遥感等技术，高效融合多源异构数据，实现大区域、长时效的外来入侵昆虫自动化监测与预警。

参考文献 (References)

Butler H, Daly M, Doyle A, Gillies S, Hagen S, Schaub T, 2016. The GeoJSON Format, 2022-10-13, https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7946.

Chen H, Chen YX, Lin N, Li ZP, Chi MX, Zhao J, 2021. Construction and application of *Solenopsis invicta* Buren epidemic investigation system based on mobile location based service. *Plant Quarantine*, 35(1): 55–60. [陈宏, 陈宜雪, 林娜, 李志鹏, 池美香, 赵健, 2021. 基于移动 LBS 服务的红火蚁疫情调查系统构建与应用. 植物检疫, 35(1): 55–60.]

Chen H, Xian XQ, Qiu RZ, Chi MX, Zhao J, 2018. Planning and conducting field surveys of invasive alien species based on GIS. *Biodiversity Science*, 26(1): 44–52. [陈宏, 冼晓青, 邱荣洲, 池

美香, 赵健, 2018. 基于 GIS 的外来入侵植物调查规划与外业实施. 生物多样性, 26(1): 44–52.]

Google, 2022. Build apps for any screen. 2022-10-13, https://flutter.dev/.

Guo JY, Xian XQ, Zhang GF, Liu WX, Wan FH, 2019. Advances in research on invasive pest insects in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1186–1192. [郭建洋, 冼晓青, 张桂芬, 刘万学, 万方浩, 2019. 我国入侵昆虫研究进展. 应用昆虫学报, 56(6): 1186–1192.]

Leaflet, 2022. An open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps, 2022-10-13. https://www.leafletjs.com/.

Lin XH, Yang ZL, Wei LL, Zheng HF, Li HX, Huang GP, 2021. Research on dynamic monitoring and control technology of *Tuta absoluta* in Lincang. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2021(1): 9–11. [林兴华, 杨子林, 韦丽莉, 郑红芳, 李海仙, 黄光平, 2021. 临沧市番茄潜麦蛾动态监测与防控技术研究. 云南农业科技, 2021(1): 9–11.]

Luo YC, Lu QY, Lu LL, Wang YR, Deng YZ, Wu F, Yang XJ, Wu JN, Wei LY, Zhang LJ, Li JZ, Du GD, 2021. Investigation of occurrence and hazard of *Solenopsis invicta* in different crop orchards and habitats. *Plant Quarantine*, 35(5): 29–33. [罗义灿, 陆覃昱, 吕丽兰, 王运儒, 邓有展, 吴凤, 杨秀娟, 吴静娜, 韦璐阳, 张莉娟, 李今朝, 杜国冬, 2021. 不同作物园区及生境类型红火蚁发生危害调查. 植物检疫, 35(5): 29–33.]

Qi GJ, Lu LH, 2018. Species characteristics and invasion status of major alien harmful insects in the tropic area of China since 2000. *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 749–757. [齐国君, 吕利华, 2018. 近年来中国热带地区外来有害昆虫的种类特征及入侵分析. 环境昆虫学报, 40(4): 749–757.]

Qiu RZ, Zhao J, Chen H, Xian XQ, Chi MX, Weng QY, 2021. Research and application of a big data collection method for invasive species surveys. *Biodiversity Science*, 29(10): 1377–1385. [邱荣洲, 赵健, 陈宏, 冼晓青, 池美香, 翁启勇, 2021. 外来物种入侵大数据采集方法的建立与应用. 生物多样性, 29(10): 1377–1385.]

Quan JC, Chen GF, Jiang YH, Huang JM, Men YJ, Lin Q, Rong RX, Chen DY, Wang SB, Mo MQ, Huang ZY, 2019. The damage investigation and the field control test of *Bactrocera dorsalis* (Hende) on peach plum and pear in Guangxi. *South China Fruits*, 48(6): 86–91. [全金成, 陈贵峰, 江一红, 黄金盟, 门友均, 林清, 容仁学, 陈德毓, 王绍斌, 莫明全, 黄自勇, 2019. 广西桃李梨桔小实蝇为害调查及其田间防控试验. 中国南方果树, 48(6): 86–91.]

Turf, 2022. Welcome to Turf.js, 2022-10-13, https://turfjs.org/.

Wan FH, Yan Y, Wang R, Yang GQ, 2011. Invasion biology: Development and perspective in China. *Journal of Biosafety*, 20(1): 1–19. [万方浩, 严盈, 王瑞, 杨国庆, 2011. 中国入侵生物学学科的构建与发展. 生物安全学报, 20(1): 1–19.]

Wang F, Zhang YZ, Wang XB, Xu J, Li YH, 2022. Distribution and damage of *Ceroplastes stellifer* (Westwood) in Yunnan province. *Journal of Biosafety*, 31(2): 191–194. [汪分, 张永翥, 王戌勃, 徐进, 李永和, 2022. 七角星蜡蚧在云南省的分布与危害. 生物安全学报, 31(2): 191–194.]

Wang YX, Zhang XH, 2018. Design of information management system for traditional Chinese medicine specimen based on NFC. *Journal of Jianghan University (Natural Science Edition)*, 46(2): 120–124. [王玉香, 张喜红, 2018. 基于 NFC 标签的中药植物标本信息管理系统. 江汉大学学报(自然科学版), 46(2): 120–124.]

Wen B, Liang P, Luo ZQ, 2014. Agricultural product traceability based on QR 2-dimension code and data aggregation. *Journal of Chinese Computer Systems*, 35(2): 261–265. [文斌, 梁鹏, 罗自强, 2014. 基于 QR 二维码和数据聚合的农业产品追溯服务系统设计. 小型微型计算机系统, 35(2): 261–265.]

Xu PY, Yu L, Chen CZ, 2018. Rapid construction of cross-platform mobile application system using the hybrid mobile app framework. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 31(3): 65–68. [许佩莹, 禹亮, 陈超智, 2018. 使用混合开发技术快速构建跨平台移动应用系统. 电信工程技术与标准化, 31(3): 65–68.]

Zhang K, Chen YB, Zhang Z, Yang LS, 2022. Research and development of techniques for integrated control of major diseases and insect pests during the Fourteenth Five-Year Plan in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 69–75. [张凯, 陈彦宾, 张昭, 杨礼胜, 2022. 中国“十四五”重大病虫害防控综合技术研发实施展望. 植物保护学报, 49(1): 69–75.]