



天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计

张飞扬, 胡月明, 谢英凯, 谢健文, 萧嘉明, 封宁, 周炼清, 史舟

引用本文:

张飞扬, 胡月明, 谢英凯, 等. 天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1029-1038.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0577>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[从作物轮作角度评价华南典型赤红壤农区耕地质量空间差异](#)

刘园, 蔡泽江, 余强毅, 吴文斌, 周清波

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1051-1063 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0526>

[基于协同克里格的县域耕地质量监测点优化布设](#)

邝珊, 胡月明, 刘振华, 杨颢, 刘洛, 谢英凯

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1020-1028 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0608>

[县域耕地质量等别监测分区布点研究](#)

谢英凯, 杨颢, 胡月明, 刘振华, 赵理

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 845-855 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0468>

[华南地区县域耕地质量和产能评价研究——以广东吴川为例](#)

戴文举, 王东杰, 卢璜, 缙武龙, 文泰斌, 王璐, 陈飞香

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 419-430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0221>

[耕地质量和产能评价指标体系研究——以广西宾阳县为例](#)

张英, 冯雪珂, 任少宝, 游小敏, 余晨

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1039-1050 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0540>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张飞扬, 胡月明, 谢英凯, 等. 天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1029–1038.

ZHANG F Y, HU Y M, XIE Y K, et al. Design of integrated space-air-ground farmland quality monitoring mobile laboratory[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1029–1038.



开放科学 OSID

天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计

张飞扬^{1,3}, 胡月明^{1,2,3,4}, 谢英凯^{1,3*}, 谢健文^{1,3}, 萧嘉明^{1,4}, 封宁^{1,5}, 周炼清⁵, 史舟⁵

(1. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广州 510642; 2. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 4. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 5. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要:中国粮食需求压力巨大,耕地质量下降会影响粮食质量和安全。现行的耕地质量监测方法因检测时间长、时空信息不足等缺陷难以满足越来越繁重的耕地质量调查监测需求。本研究探讨了适用于耕地质量监测的方法及移动实验室案例,构建了天空地一体耕地质量监测指标体系,搭建了集成卫星遥感、无人机遥感、无线传感器网络 and 原位速测等技术的移动实验室架构,研发了基于中间件技术的天空地多种监测方法的集成技术;创制了一套天空地一体的耕地质量监测移动实验室,并在耕地提质改造项目区域进行了实地测试,在2 h内完成5个采样点的土壤养分、重金属等13个项目所需指标的现场速测,验证了本研究成果与常规耕地质量监测方法相比监测效率和现场出具结果的能力更强。本研究能够弥补现行耕地质量监测方法的不足之处,并且在监测指标全面性和监测数据时空尺度上都更有优势,能大大提升各级业务部门耕地质量监测的效果,加强耕地管理和保护的能力。

关键词:耕地质量;移动实验室;监测;集成;卫星遥感;无人机

中图分类号:S159

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)06-1029-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0577

Design of integrated space-air-ground farmland quality monitoring mobile laboratory

ZHANG Feiyang^{1,3}, HU Yueying^{1,2,3,4}, XIE Yingkai^{1,3*}, XIE Jianwen^{1,3}, XIAO Jiaming^{1,4}, FENG Ning^{1,5}, ZHOU Lianqing⁵, SHI Zhou⁵

(1. Guangzhou South China Academy of Science and Technology of Natural Resources, Guangzhou 510642, China; 2. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 5. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: China is facing a great challenge with grain demand. Meanwhile, the decline of farmland quality will affect the quality and safety of food. The existing methods of farmland quality monitoring are characterized by a long time period and a lack of detailed spatial information of farmland quality. They could not provide the data that meet the requirements of farmland quality monitoring. This study explored a new methods and mobile laboratory for farmland quality monitoring. A farmland quality monitoring indicator system consisting of the variables or predictors that can be fast measured spatially and temporally was first developed. In this study, a framework which integrated satellite remote sensing monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring, wireless sensor network (WSN) monitoring and in situ measurement method into a farmland quality monitoring mobile laboratory was built. This study also explored the integration of remote sensing, UAV, WSN and ground-based monitoring methods through middleware technologies that connect various components of the system. Moreover, this study developed of a farmland quality monitoring mobile laboratory with an optimal design of routines for fast collection of data. A on-site test was carried out in the area of farmland upgrade and reconstruction program, which took less than 2 hours

收稿日期: 2021-08-31 录用日期: 2021-10-25

作者简介: 张飞扬, 广东广州人, 主要从事耕地质量监测技术、无线传感器网络、无人机等方面的研究。E-mail: eefy@163.com

*通信作者: 谢英凯 E-mail: 978229996@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFD1100204); 国家自然科学基金项目(U1901601); 四川省科技计划项目(2020YFG0033)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2020YFD1100204); The National Natural Science Foundation of China(U1901601); Science and Technology Projects of Sichuan Province(2020YFG0033)

to quick test 13 indicators for 5 sampling points showed higher efficiency and on-site analysis capability compared with traditional farmland quality monitoring method. This study overcame the gaps that currently exist in the traditional farmland quality monitoring methods, realized comprehensive and multi-scale monitoring of farmland quality, promoted the effectiveness of monitoring cultivated land, and enhanced the capacity of farmland management and protection.

Keywords: farmland quality; mobile laboratory; monitoring; integration; satellite remote sensing; unmanned aerial vehicle

中国用世界7%左右的耕地养活了世界约19%的人口,人均耕地面积排在世界126位,粮食需求的压力巨大^[1]。虽然近年来我国实行的耕地保护政策使耕地数量趋于稳定^[2],但随着城镇化、工业化的发展,耕地“占优补劣”、耕地退化、环境污染等导致耕地质量问题愈发严重,直接影响粮食质量与农产品安全^[3]。相对于耕地数量的变化,耕地质量受自然、生态、生产、经济、社会多重因素影响,其变化更为复杂^[4]。我国正在构建耕地数量、质量、生态“三位一体”的耕地管理和保护新格局,其中耕地质量监测是耕地管理工作的基础,是开展耕地保护工作的重要前提^[5-6]。

现行的国家标准、行业标准中对耕地质量的监测,主要依靠野外现场调查和实验室化验分析。工作人员到达现场后通过观测判断、问卷调查、挖剖面进行测量等方式获得现场记录并采集土样。土样送回实验室进行自然风干和研磨过筛等预处理工序后,进行物理分析、化学分析或电化学分析,获得实验数据。上述方法虽然能够消除环境因素对检测数据的影响,但是整个采样分析流程的周期长,无法现场快速出具监测评价结果,并且数据的时空变化信息较少^[7]。在常规监测方法中引入移动实验室进行耕地质量监测,可以实现现场快速获取耕地质量监测数据^[8]。

国外已进行了移动实验室的研究和应用。美国耕地监测移动实验室大部分是由公司或实验室运营,为用户提供耕地现场快速监测服务^[9-11],例如Environmental Chemistry Consulting Services公司的移动实验室、New Age Laboratories的移动实验室等,主要监测耕地土壤、灌溉水及各类严重影响农产品安全和消费者身体健康的污染指标。巴西Embrapa公司的Fertmovel移动实验室和印度ELICO移动实验室主要监测耕地土壤的pH值、钾、磷等耕地土壤养分指标。

近年来,我国的移动实验室已应用在食品安全、检验检疫等多种业务当中^[12-13],例如中国检验检疫科学研究院的肉制品安全移动实验室^[14]、中国农业科学院的农产品质量安全监测移动实验室^[15]、中国人民解放军第二军医大学的生物采样侦检车^[16]等。并且,可

用于耕地质量监测的快速检测技术也有一定的发展^[17-18]。然而,移动实验室只使用车内速测仪器进行耕地质量监测,数据的时空变化信息依旧较为匮乏,需要进一步集成时间和空间信息更丰富的监测技术。

卫星遥感监测技术、无人机监测技术、物联网监测技术和地面速测装备的发展为耕地质量监测方法的创新提供了理论基础^[19]。卫星遥感监测可以周期性获得广域范围内卫星遥感监测数据^[20],适用于大范围耕地质量监测与预警分析^[21],但是遥感数据易受大气等环境干扰,且数据空间分辨率相对较低^[22],无法满足精细耕地质量监测需求。无人机监测可获得高空间分辨率的低空遥感数据^[23],能够有效完成新增耕地、占补平衡等高精度调查监测^[24-25],但监测成本高,不适合大区域作业,需要其他手段辅助^[26-27]。以无线传感器网络为代表的物联网技术可以定时采集、自动传输现场的土壤含水量、pH值等环境数据^[28-30],能够满足部分耕地质量监测指标的高时间分辨率监测需求,但是传感器监测精度容易受环境影响^[31-32]。地面速测设备可以现场完成土壤等指标的分析,精度相对高于遥感和物联网监测数据,但是需要进行人工采样和操作,监测范围和工作效率较低^[33-35]。如果直接将卫星遥感监测、无人机监测、物联网监测和地面速测应用于耕地质量监测,多类型的监测技术将会使监测工作变得更加复杂。

综上所述,现有监测方法在监测效率等方面还有缺陷,不太适宜直接应用于耕地质量监测中对耕地质量巡查和污染应急监测等对现场执法和时空数据分析有需求的业务。标准的耕地质量监测方法费用高、分析时间长,不适于耕地质量巡查等需要分析大量地块的业务,也较难及时监测突发污染地区的耕地质量空间和时间变化情况^[36]。移动实验室监测方法分析速度快、能够现场完成检测,但是数据的时空变化信息较少^[37]。天空地多种监测方法能够提供丰富的时空变化信息,但是同时使用多监测系统会导致监测系统非常复杂^[38]。本研究以移动实验室作为平台,集成天空地多种监测系统,探索创新一套现场快速获取耕地质量监测点及时空变化的监测方法。与标准的耕

地质量监测方法搭配使用形成优势互补,满足不同耕地质量业务对现场出具监测数据和数据时空信息等需求^[39]。

本研究整合多部委原有的耕地质量监测指标并结合天空地多种监测技术的特点,构建天空地一体耕地质量监测指标体系;以移动实验室为平台,结合地面原位监测、无线传感器网络监测、无人机监测、卫星遥感监测,设计天空地一体移动实验室架构;利用中间件技术,设计将天空地多种监测方式与移动实验室结合的集成方法。最终完成天空地一体耕地质量监测移动实验室集成设计,为实现耕地质量多时空尺度的快速监测提供了技术支撑。

1 天空地一体移动实验室集成设计

1.1 耕地质量监测指标体系构建

自然资源部与农业农村部均涉及耕地质量保护工作,但不同业务部门所采取的指标体系一般会侧重于各自的业务需求,并且均以常规的现场调查和实验室分析的监测方式为基础。原国土资源部于2011年下发《国土资源部办公厅关于开展耕地质量等级监测试点工作的通知》(国土资厅函〔2011〕5号),监测指标采用原《农用地分等指标》,内容囊括农用地的土壤环境指标、地形因素和水利条件,主要反映耕地的潜在生产能力。原农业部的全国耕地地力调查与质量评价工作中采用的耕地地力评价指标体系,考虑了土壤、肥料、环境、国土、作物栽培、信息系统等多方面因素影响。此外,现有的指标主要考虑不同区域情况,对快速分析和现场执法等业务需求响应较弱。现有的监测指标体系无法满足快速耕地质量移动监测的需求,有必要建立一套既满足业务需求又具备科学性、可操作性的天空地一体耕地质量移动监测指标体系。

耕地质量移动监测应充分发挥其机动性强、实时性高、覆盖性广及智能化优势,切实解决传统监测存在的问题,为业务部门提供科学高效的监测模式及管理决策支持。本研究使用频度分析法和特尔斐法进行监测指标的选取,监测指标的选取应该充分考虑业务需求,在指标选取过程中应遵循科学性和可操作性原则,建立在业务部门标准规程以及实际项目经验的基础上,统计分析国土、农业标准规程和实际项目的指标体系,每个指标需经过相关领域专家论证和科学知识推理;同时能够体现快速、高精度等特性,可快速响应耕地质量灾害及污染事件的应急监测,解决传统

监测手段的低效问题,监测结果真实准确,避免数据误差影响到管理决策。本研究以原国土资源部《农用地分等规程》(TD/T 1004—2003)和原农业部《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T 1634—2008)为基础,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)、《高标准农田建设评价规范》(GB/T 33130—2016)、《耕地质量监测技术规程》(NY/T 1119—2019)等国土和农业的指标体系,对指标进行系统地分析整理并提取使用频率较高的指标,同时综合国土、农业、环保各部门的监测需求,遵循科学性和可操作性原则,考虑土地整治、高标准基本农田建设等工程措施对各项指标的人为干扰^[33],结合卫星影像、无人机、无线传感器网络和原位监测技术,通过征询专家意见进行筛选和综合调整,建立了一套耕地质量监测移动实验室的指标体系。具体指标如表1所示。

在天空地多种监测方式中,代表“天”的卫星遥感监测的高光谱遥感数据主要用于获取有机质含量、土壤全氮等与耕地地力相关的指标以及土壤重金属元素、盐碱程度等污染相关的指标^[40],多光谱遥感数据监测植被覆盖率、叶面积指数等指标,可见光遥感影像则监测田面坡度等指标;代表“空”的无人机监测的高光谱成像数据用于获取土壤有机质、土壤氮磷钾、土壤重金属等指标,多光谱成像数据监测归一化植被指数、植被覆盖率等指标,航拍影像需要获取灌溉保证率、田间道路通达度、岩石露头度等指标;代表“地”的无线传感器网络和原位速测技术可以测得有机质含量、氮磷钾含量、重金属含量、田面坡度等指标。

1.2 耕地质量监测移动实验室架构设计

本研究创新一套以移动实验室为平台,集成卫星遥感、无人机、无线传感器和原位监测等多种方法,建立从高空、低空、地表到地下的多层级耕地质量监测体系(图1),实现比现有移动实验室更强的时间和空间变化识别能力。

本研究的移动实验室平台是一台全顺客车,北京环达汽车装配有限公司进行改装,车身全长6.50 m、宽2.08 m、高2.95 m,改装后总质量3.93 t,车体划分成驾驶区、监测区、承载区,车内由蓄电池、汽油发电机或外接市电进行供电,并配备了给排水、空调、4G无线路由。

利用我国高分系列卫星和其他遥感卫星获取大区域、周期重复测定的图像及多光谱、高光谱等遥感数据,结合耕地质量地面光谱与地面调查数据,可产

表1 耕地质量监测移动实验室监测指标

Table 1 The monitoring indicators of farmland quality monitoring mobile laboratory

序号 ID	指标类型 Index	监测方法 Monitor method	类型 Type	内容 Content
1	地形	现场调查/参考二调成果、地形图、DEM等	天、空,直接获取	具有特定形态特征和成因的中小地貌单元,直接影响耕地利用的适宜性,同时对排水和灌溉、农机具的使用以及土壤侵蚀都有直接影响
2	田面坡度	地形图上量算/有条件的可通过测坡仪实地测定、DEM	天、空,直接获取	地表单元陡缓的程度,决定物质、能量和降水的再分配过程,对土壤物理和化学特性有重要影响
3	地下水水位	实地测量潜水面与地面的铅垂距离/查阅当地水文资料	地,直接获取	常年潜水面与地表面的铅垂距离,影响耕地质量和开发潜力的因素之一
4	有效土层厚度	参考第二次土壤普查数据,并结合野外实际调查/人工钻探	地,直接获取	作物能够利用的母质层以上的土体总厚度,反映人类生产活动对土壤熟化的程度,对土壤剖面的发生和发育有重要影响。
5	表土质地	野外实际调查,手测判断/实验室分析/参考第二次土壤普查成果	地,直接获取	表层/耕层土壤中不同矿物颗粒的大小及其组合情况,决定土壤水、肥、气、热等重要因素,亦是决定土壤利用、管理和改良措施的重要依据,反映土壤耕作性能
6	剖面构型	现场挖掘判断,并留存剖面照片发送至土壤领域专家协助判断/参考第二次土壤普查数据	地,直接获取	土壤发生层或土壤层次的排列组合型式,对水、肥、气、热的调控能力有重要影响
7	有机质含量	重铬酸钾外加热法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	存在于土壤中的所有含碳的有机物质,对土壤形成、土壤肥力等有着重要作用
8	pH值	电位法、电化学分析、土壤普查成果,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	土壤溶液的酸碱性强弱程度,影响农作物的生长
9	灌溉保证率	现场调查灌溉设施进行评估,遥感间接估计	空、地,间接估计	预期灌溉用水量在多年灌溉中能够得到充分满足的年数的出现几率,是农作物高产的重要保证
10	排水条件	现场调查排水设施进行评估,遥感间接估计	空、地,间接估计	为保证农作物正常生长,及时排除农田地表积水,有效控制和降低地下水水位的能力
11	障碍层距地表深度	现场挖掘剖面判断	地,直接获取	耕层以下出现的阻碍根系伸展、影响水分渗透的层次,其最上层到地表的垂直距离,影响农作物的生长
12	地表岩石露头度	现场目测,遥感间接估计	天、空,间接估计	基岩出露地面占地面的百分比,影响机械化耕作
13	盐碱程度	据土样检测结果判定、水溶性盐总量测定,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	土壤含有可溶性盐的类型和轻重程度,影响农作物生长
14	土壤全氮	半微量凯式法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	由土壤提供的植物生长所必需的营养元素,在土壤中能直接或间接转化后被植物根系吸收的矿质营养成分,与作物长势及产量密切相关
15	土壤有效磷	酸性土壤:氟化铵-盐酸提取-钼锑抗比色法/碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;石灰性土壤:NY/T 148—1990,遥感间接估计	天,间接估计; 地,直接获取	
16	土壤速效钾	中性乙酸铵溶液浸提、火焰光度计法,遥感间接估计	天,间接估计; 地,直接获取	
17	容重	环刀法	地,直接获取	田间自然垒结状态下单位容积土体的质量,作为表征土壤熟化程度的指标之一
18	阳离子交换量	石灰性土壤:化学测定;中性土壤:乙酸铵交换-蒸馏滴定法	地,直接获取	每千克土壤中所含有的全部交换性阳离子,代表土壤可能保持的养分量,即保肥性的高低,也反映了土壤的缓冲性能,是改良土壤和合理施肥的重要依据
19	土壤铅含量	石墨炉原子吸收分光光度法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	在重金属化学定义范围内,对生命体及非生命体产生累积并危害生态环境及个体健康的无机污染物,含量过高或生物活性增加会对农作物、地表水、地下水及大气环境产生危害
20	土壤镉含量	石墨炉原子吸收分光光度法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	
21	土壤汞含量	原子荧光光谱法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	
22	土壤砷含量	原子荧光光谱法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	
23	土壤铬含量	火焰原子吸收光谱法,遥感间接估计	天、空,间接估计; 地,直接获取	
24	田间道路通达度	在土地利用现状图上量算/卫星图像直线衰减法	天、空、地,直接获取	田块耕作的交通便利程度,影响田间耕作便利程度和耕地利用管理水平

续表1 耕地质量监测移动实验室监测指标

Continued table 1 The monitoring indicators of farmland quality monitoring mobile laboratory

序号 ID	指标类型 Index	监测方法 Monitor method	类型 Type	内容 Content
25	农作物精细化分类	地面调查结合遥感影像分类	天、空,间接估计; 地,直接获取	耕地上种植的农作物具体类别
26	叶面积指数	遥感影像/地面调查结合遥感影像	天、空,直接获取	植被叶片总面积与其下面覆盖的土地面积比值,衡量农作物的生长情况,从而反映耕地质量情况
27	归一化植被指数	遥感影像/地面调查结合遥感影像	天、空,直接获取	反映植被的生长状况和覆盖程度
28	植被覆盖率	照相法/遥感影像/地面调查结合遥感影像	天、空,直接获取	植被在地面的垂直投影面积占统计区总面积的比例,反映耕地内农作物的整体生长情况
29	粮食估产	遥感影像/地面调查结合遥感影像	天、空,间接估计	根据农作物长势预估农作物产量,反映耕地质量对农作物生长的影响
30	植被生物量	遥感影像/地面调查结合遥感影像	天、空,间接估计	单位面积内农作物的总干质量,反映耕地内农作物的生长情况

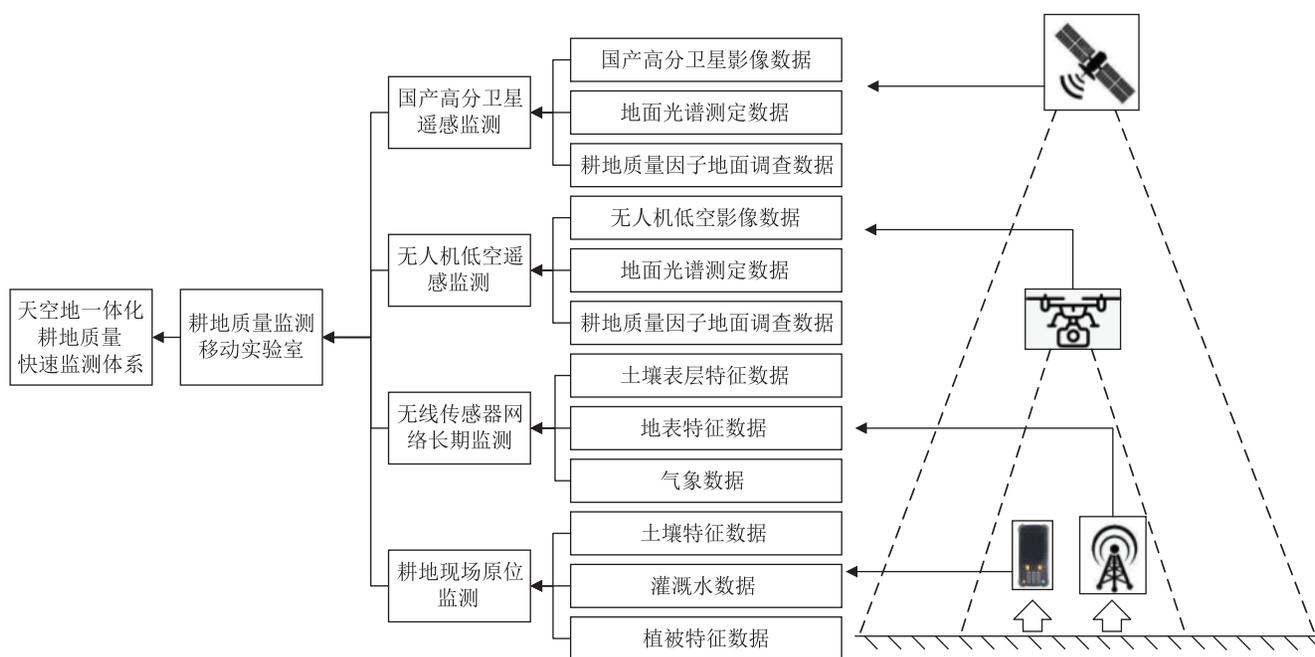


图1 耕地质量监测移动实验室整体架构

Figure 1 The overall methodological framework of farmland quality monitoring mobile laboratory

生大区域、周期性的卫星遥感耕地质量监测指标,实现耕地质量宏观动态监测。本系统现使用高分一号卫星数据,可以获得2 m分辨率的全色、8 m分辨率的多光谱数据,覆盖周期41 d。

利用多旋翼和固定翼无人机搭载传感器,获取特定区域高时空分辨率的耕地图像、多光谱、高光谱以及三维模型等低空遥感数据,可有效弥补卫星遥感数据不足,实现耕地质量监测指标的局域高精度测量。本系统现使用大疆的精灵4无人机,最大飞行速度50 km·h⁻¹,垂直定位精度±0.1 m、水平定位精度±0.3 m,最长飞行时间约27 min。无人机搭载1台集成了1个可见光传感器和5个多光谱传感器的长光禹辰MS600多

光谱相机,单个传感器有效像素208万,多光谱包含蓝、绿、红、红边、近红外,地面采样距离为H/18.9,单位为厘米每像素,H为无人机飞行高度。

本团队以CC2530作为无线传感器网络节点的主要模块研发的无人机-无线传感器网络监测系统由地面采集节点和无人机机载汇聚节点组成^[41],可以获取耕地采样点的土壤、灌溉水、气象以及农作物图像的耕地质量监测数据,实现重点监测区域的地表特征数据长期连续采集,采样时间比常规系统减少25%,数据传输效率是常规系统的8倍,数据传输能耗比常规系统降低50%^[42]。

利用便携式分析仪、台式速测仪等原位测量仪器

设备,可在现场分析土壤、灌溉水、农作物等样品数据,快速获取采样点土壤特性等耕地质量监测指标。本系统现主要使用托普仪器的TPY-6土壤养分速测仪,可测土壤的氮、磷、钾、pH值、有机质含量,pH值的相对误差±0.5,其他相对误差±5%;使用一台便携式光谱仪,采集土壤的高光谱数据并反演重金属等元素含量。

通过天空地多种监测方式配合,可有效满足耕地质量监测在覆盖范围、时空采样频率、时效性、观测精度等方面的需求。从空间尺度来看,高分卫星遥感-无人机低空遥感-地面无线传感器网络和原位监测实现了区域-农田-样点的监测;从时间尺度来看,无线传感器网络-高分卫星遥感-无人机低空遥感和地面原位监测实现了高频-中频-低频的监测。

1.3 移动实验室集成

天空地多种监测方法组合有效满足了耕地质量监测在覆盖范围、采样频率、时效性、观测精度等方面的需求,但是多种监测手段集成使得监测过程与数据类型较为复杂,需要创新设计并研制天空地一体化监测的集成设备。天空地一体监测方法的集成主要使用了物联网中间件技术,为卫星遥感、无人机、无线传感器网、原位监测多种方式分别设计硬件中间件、软件中间件和平台中间件,将多种监测方法集成到移动实验室与数据中心,实现耕地质量信息的融合、存储和远程传输。天空地一体监测方法的集成架构如图2所示。

(1)通过硬件中间件将地面监测的移动实验室车载设备集成到数据中心。移动实验室内每台仪器设备都会加装作为硬件中间件的数据通信节点,这些节点由控制模块、接口模块、通信模块和存储模块组成。接口模块用于连接仪器设备,负责节点与仪器设备的通信;通信模块用于接入车内局域网,负责节点与数据中心通信;存储模块用于某一端通信不正常时,缓

存数据或者命令;控制模块则是总控节点各个模块。仪器设备完成分析的数据通过数据通信节点自动传输到移动实验室数据中心,数据中心对仪器设备的命令也通过数据通信节点传输到对应的仪器设备。以此完成将土壤大量元素、重金属元素等指标的监测方法集成到移动实验室。硬件中间件拟采用Arduino及其各类功能模块。Arduino是一种开源的电子原型平台,不仅能够方便快捷地进行软硬件开发,各类型号都留有足够丰富的接口,例如数字输入输出、模拟输入输出、UART串行通信、SPI、I2C。其开源硬件的特性也带来了丰富的外接配件,例如RS232、RJ45等,非常适用于仪器设备多样的天空地一体移动实验室。

(2)通过软件中间件将地表立体无线传感器网络和低空无人机集成到数据中心。软件中间件运行在移动实验室数据中心内,当无人机完成低空遥感数据采集和地面无线传感器网络数据汇聚后,外业人员将无人机存储与数据中心相连接,软件中间件自动提取无人机存储的数据,并根据数据类型进行分类整理。这就实现了将pH值、灌溉保证率等指标的监测方法集成到移动实验室。软件中间件拟使用C#编写运行在车内数据中心的窗体程序,在识别到无人机存储连接后对存储内容进行扫描,并根据文件的时间、坐标点等信息进行分组存储。

(3)通过平台中间件将卫星遥感监测集成到数据中心。平台中间件运行在移动实验室数据中心,根据耕地质量监测任务的区域范围、采样点分布等信息,向卫星遥感数据服务平台发出数据传输申请,并且将数据引导至实验室云平台。这就实现了将地形、农作物分类等指标的监测方法集成到移动实验室。

通过技术集成提升了耕地质量天空地一体化监测的设备自动化以及信息化管理程度,能够实现不同监测仪器设备的数据自动读取、自动传输、自动存储,多种方式采集得到的数据由移动实验室数据中心统

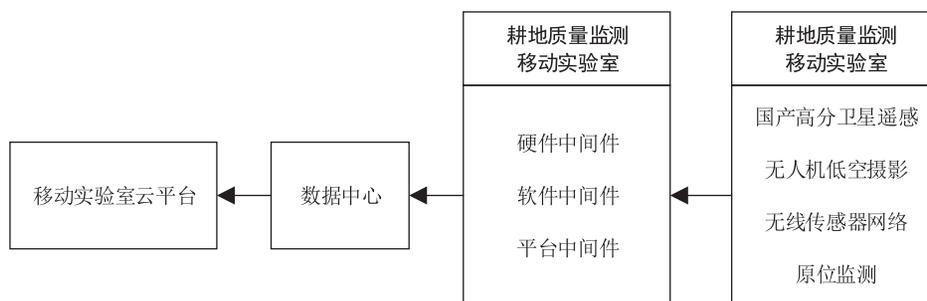


图2 天空地一体耕地质量监测方法信息化集成

Figure 2 An integrated method for Space-Air-Ground farmland quality monitoring

一整合并发送至远程服务器,降低了数据录入过程的工作量和人为出错几率;同时实现了数据的可追溯,每一步操作都会与数据一起自动记录并在线传输,为进行数据复查提供有力的支持,能够提升监测数据的准确性。

2 结果与讨论

基于上述的探讨,本研究设计并研制了天空地一体的耕地质量监测移动实验室原型系统(图3)。移动实验室配备了无人机、无线传感器网络、速测仪、工作站等设备,开发了数据采集、分析、传输、管理等软件系统;同时,移动实验室进行了供水、供电、换气等硬件改造,并配备了车内局域网、4G网络。移动实验室装配了部分速测仪器及设备,参与完成了耕地质量调查、旱改水工程验收等工作。根据现场工作情况,天空地一体移动实验室能够实现不同类型观测数据的统一整合、高效管理、快速调用分析。

2019年6月27日,根据耕地提质改造项目主要监测指标的需求,移动实验室搭载高光谱仪、土壤养分速测仪、电子天平以及取样工具,对广州市花都区炭步镇华岭村的耕地提质改造项目的耕地现场进行耕地质量监测。移动实验室2 h内采集总共5个样点的土样及土壤光谱,利用土壤养分速测仪现场检测土壤有机质含量和pH值,利用高光谱仪反演镍、铅、铜、砷、锌、镉、汞、铬的元素含量,并用常规方法获取土壤机械组成。与传统监测方法相比,移动实验室极大地缩短了获取数据的时间,可在现场快速出具耕地质量监测数据。采样点分布和检测结果如图4和表2所示。

与传统的耕地质量监测方法相比,本研究创制的天空地一体移动实验室具有以下几个优势:

首先,集成后的天空地一体耕地质量监测移动实验室可以降低传统耕地质量监测所需的时间、人力和物力成本。移动实验室可以实现耕地质量监测指标的现场采集、现场检验分析,并通过集成化系统将数

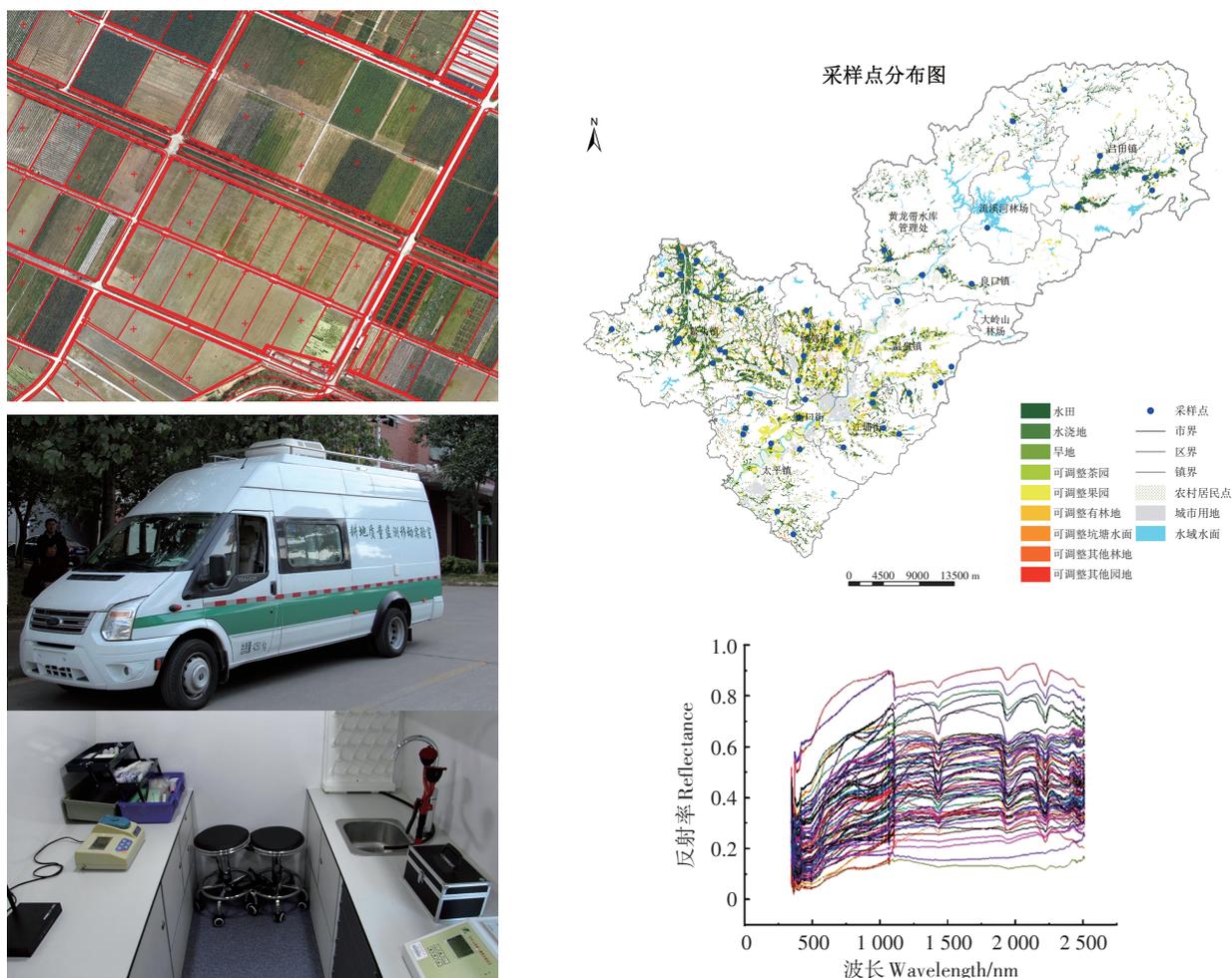


图3 耕地质量监测移动实验室

Figure 3 Farmland quality monitoring mobile laboratory

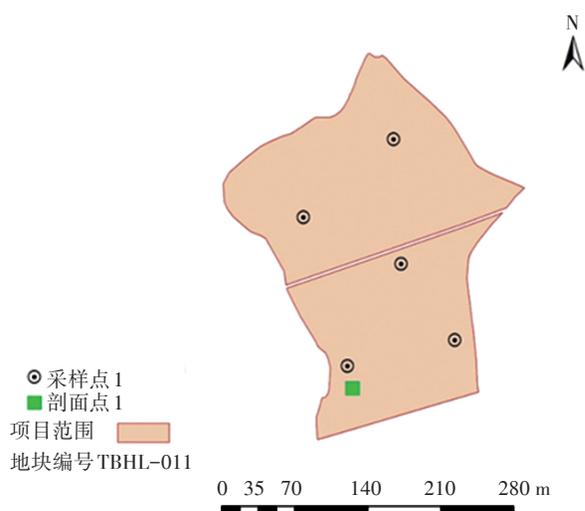


图4 采样点分布图

Figure 4 Sampling point distribution map

表2 耕地质量检测结果

Table 2 Test results of farmland quality

样品标识 Sample ID	检测项目 Test items	单位 Unit	检测结果 Test results
TBHL-011	pH值	—	7.80
	有机质	g·kg ⁻¹	16.3
	机械组成(<0.01 mm)	%	35.5
	机械组成(质地)	—	壤土
	机械组成(质地名称)	—	中壤土
	镍	mg·kg ⁻¹	27
	铅	mg·kg ⁻¹	60.6
	砷	mg·kg ⁻¹	19.5
	铜	mg·kg ⁻¹	41
	锌	mg·kg ⁻¹	122
	镉	mg·kg ⁻¹	0.28
	汞	mg·kg ⁻¹	0.121
	总铬	mg·kg ⁻¹	82

据自动传输至远程云平台进行运算分析,将原来需要至少一个月的耕地质量监测指标检验分析过程缩短为现场可以完成采样点指标的采集、检验分析、数据传输和存储。在完成区域内所有采样点指标采集的同时,云平台就可以开始运算分析所需监测的目标耕地及其周边区域的指标现状、指标变化过程并进行预测预警,缩短了原来人工收集、整理检验分析所得的数据,手工录入系统并进行数据整合分析的过程。

其次,全流程的信息化和低空遥感、卫星遥感数据的利用,实现了耕地质量监测指标的分析过程及数据来源的可追溯性,降低了调查人员现场主观判断对

结果的影响,也为指标复查分析提供条件。现有耕地质量监测方法当中,对于灌溉保证率等现场调查、人工记录的指标,难以进行指标的检验和复查。常规实验室化验分析的指标也需要人工调取周边过往数据,以此来判断数据是否有误,如果差异较大还需重新进行化验分析。天空地一体耕地质量监测移动实验室的低空遥感数据和卫星遥感数据可以全面地记录目标耕地及周边地区的情况,为现场调查指标的判断和复查提供清晰完整的判断依据。集成化、信息化的移动实验室不仅可以记录指标采样分析过程中的每一步操作,提升指标数据的可追溯性,还能够云平台内自动调用周边数据和过往数据来判断数据准确性,快速将指标数据准确性判断结果反馈给移动实验室内的工作人员。

更重要的是,天空地多种监测方式的集成综合了地面监测点监测、小区域范围的高时空分辨率无人机低空遥感监测和大区域范围的可重复卫星遥感影像监测。三种监测方式相辅相成,实现由点到面的长期监测,快速、实时、精准地反映研究区耕地质量的时空动态。传统的耕地质量监测方式获取的是以现场调查采样当天、目标耕地当中采样点的数据为代表的区域数据。耕地质量监测移动实验室由于集成了天空地三大平台多种监测方法,因此在空间和时间分布上都远优于传统的方法。在空间方面,移动实验室各类地面监测方法采集的是采样点数据,无人机低空遥感采集耕地及周边区域的数据,卫星遥感采集整个区域完整的数据。在时间方面,移动实验室车载的速测仪器、便携设备以及无人机平台采集当天的数据,卫星遥感获取周期性的数据,无线传感器网络每日定时采集数据。这种时空与点面耕地质量监测的融合,实现了耕地质量由点到面、实时、快速、高效与精准监测。

与国外的耕地质量移动实验室相比,本研究创制的天空地一体移动实验室在指标全面性和监测数据时空尺度上都更有优势。在指标全面性方面,国外的移动实验室只使用车内速测的监测方法,受车内空间所限无法部署大量的仪器设备。因此美国的移动实验室主要监测与污染相关的指标,巴西、印度的移动实验室主要监测耕地养分相关的指标。本研究的移动实验室集成了天空地多种监测方法,能够监测地形、土壤、植被、基础设施等多种类型的指标。在时空尺度方面,国外的移动实验室只能获得到达现场的某个时刻某个点的数据,本研究能够通过天空地多种手段获得多种空间尺度数据,在移动实验室离开现场后

也能通过无线传感器网络和卫星遥感定时获得监测数据。

下一步,本团队将根据本研究的指标体系和架构设计,进一步补充完善天空地多种监测方式的仪器设备,例如XRF元素分析仪等。

3 结论

耕地质量监测是实现数量、质量、生态“三位一体”耕地管理和耕地保护的基础。实时、高效、便捷和全面的耕地质量监测方法可以为各级业务部门进行耕地提质改造、耕地数量质量占补平衡、耕地污染监管与预警等业务提供强有力支持。

本研究设计了天空地一体的耕地质量监测集成技术,将多种天空地新型监测技术优势互补,实现了天空地一体的耕地质量快速、实时、高效与精准监测,为耕地管理和耕地保护提供一种适宜实施长期监测、大范围监测、日常业务调查监测、污染应急监测等各类耕地调查监测业务的新型监测手段。

参考文献:

- [1] 闫东浩,陈守伦,王慧颖.我国耕地质量监测保护技术标准体系建设现状、问题与建议[J].中国农技推广,2019,35(7):5-14. YAN D H, CHEN S L, WANG H Y. The status, problems and suggestions for the construction of Chinese farmland quality monitoring and protection technical standard system[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2019, 35(7):5-14.
- [2] 陈彦清.网格环境下基于多尺度指标体系的耕地质量评价方法研究[D].北京:中国农业大学,2015. CHEN Y Q. A cultivated land quality evaluation method based on multi-scale indicators' system in grid environment[D]. Beijing:China Agricultural University, 2015.
- [3] 辛芸娜,范树印,孔祥斌,等.四重质量维度下的县域耕地质量评价方法研究[J].资源科学,2018,40(4):737-747. XIN Y N, FAN S Y, KONG X B, et al. Evaluation of cultivated land quality based on four quality dimensions[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4):737-747.
- [4] 温良友,孔祥斌,张蚌蚌,等.基于“过程-功能-质量-特性-指标”的耕地质量评价指标体系研究[J].土壤通报,2017,48(6):1296-1303. WEN L Y, KONG X B, ZHANG B B, et al. Study on cultivated land quality evaluation index system based on process-function-quality-characteristic-index[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6):1296-1303.
- [5] 祖健,郝晋珉,陈丽,等.耕地数量、质量、生态三位一体保护内涵及路径探析[J].中国农业大学学报,2018,23(7):84-95. ZU J, HAO J M, CHEN L, et al. Analysis on trinity connotation and approach to protect quantity, quality and ecology of cultivated land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(7):84-95.
- [6] 张超,乔敏,邱文聚,等.耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J].农业机械学报,2017,48(1):1-6. ZHANG C, QIAO M, YUN W J, et al. Trinity comprehensive regulatory system about quantity, quality and ecology of cultivated land[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1):1-6.
- [7] 尚凯丽.耕地质量监测方法及实证研究[D].济南:山东师范大学,2017. SHANG K L. Methods and empirical research of cultivated land quality monitoring[D]. Jinan:Shandong Normal University, 2017.
- [8] SMOLKA M, PUCHBERGER-ENENGL D, BIPOUN M, et al. A mobile lab-on-a-chip device for on-site soil nutrient analysis[J]. *Precis Agric*, 2017, 18(2):152-168.
- [9] WANG Y, LI Y, LIU Y, et al. A mobile laboratory for rapid on-site analysis of catechols from water samples with real-time results production[J]. *RSC Adv*, 2016, 6(84):80885-80895.
- [10] WIEST J, STADTHAGEN T, SCHMIDHUBER M, et al. Intelligent mobile lab for metabolics in environmental monitoring[J]. *Anal Lett*, 2006, 39(8), 1759-1771.
- [11] WHICKER R, WHICKER M, JOHNSON J, et al. Mobile soils lab: On-site radiological analysis supporting remedial activities[J]. *Health Phys*, 2006, 91(Suppl 2):24-31.
- [12] 北京市食品安全监控中心.食品安全风险监测移动实验室:201020197562.7[P].2011-02-16. Beijing Food Safety Monitoring Center. Food safety monitoring mobile laboratory: 201020197562.7 [P]. 2011-02-16.
- [13] 张瀚闻,苏锡辉,那宏坤.移动实验室及其发展[J].品牌与标准化,2016(3):38-43. ZHANG H W, SU X H, NA H K. Mobile laboratory and its development[J]. *Brand & Standardization*, 2016(3):38-43.
- [14] 中国检验检疫科学研究院.一种现场快速检测肉制品安全的成套设备及检测方法:201310392698.1[P].2013-12-11. Chinese Academy of Inspection and Quarantine. A complete set of equipment and method for quickly detecting the safety of meat products on site: 201310392698.1[P]. 2013-12-11.
- [15] 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所.农产品质量安全监测移动实验室:201310176543.4[P].2013-08-21. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-Products of CAAS. Agricultural product quality and safety monitoring mobile laboratory: 201310176543.4[P]. 2013-08-21.
- [16] 中国人民解放军第二军医大学.一种生物采样检测车及其车载检测系统:201210271547.6[P].2012-11-28. Naval Medical University. Biological sampling detection vehicle and its vehicle-mounted detection system:201210271547.6[P]. 2012-11-28.
- [17] 周怡,纪荣平,胡文友,等.我国土壤多参数快速检测方法和技术研发进展与展望[J].土壤,2019,51(4):627-634. ZHOU Y, JI R P, HU W Y, et al. Advancement and prospect in methods and techniques for soil multi-parameter rapid detection of China[J]. *Soils*, 2019, 51(4):627-634.
- [18] 黄艳华,李文婷,冯少红.农残速测技术在基层农产品质量安全检测工作中的应用及发展建议[J].宁夏农林科技,2018,59(1):39-42,封2. HUANG Y H, LI W T, FENG S H. Application and countermeasures of rapid detection technology of pesticide residue for primary agricultural product quality and safety[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(1):39-42, inside front cover.
- [19] YOU H K, LI S H, Xu Y F, et al. Tree extraction from airborne laser scanning data in urban areas[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17):3428.
- [20] 米成林,卜春燕,汪延彬.基于3S技术的甘肃省耕地质量等别监

- 测评价研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1374-1380. MI C L, BU C Y, WANG Y B. Study on monitoring and evaluating the cultivated land quality grade in Gansu Province based on 3S technology[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1374-1380.
- [21] 彭一平, 刘振华, 肖北生, 等. 基于高分遥感的县域耕地质量监测[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 841-846. PENG Y P, LIU Z H, XIAO B S, HU Y M. Research on county cultivated land quality monitoring based on high resolution remote sensing[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(4): 841-846.
- [22] 马佳妮, 张超, 吕雅慧, 等. 多源遥感数据支撑的耕地质量监测与评价[J]. 中国农业信息, 2018, 30(3): 14-22. MA J N, ZHANG C, LÜ Y H, et al. Monitoring and evaluation of cultivated land quality supported by multi-source remote sensing[J]. *China Agricultural Informatics*, 2018, 30(3): 14-22.
- [23] 刘鑫. 基于无人机高分辨率遥感影像的四川低丘区耕地信息提取研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2017. LIU X. The research on information extraction of cultivated land in low hills of Sichuan Province based on UAV high-resolution remote sensing image[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [24] 郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 等. 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望[J]. 生物多样性, 2016, 24(11): 1267-1278. GUO Q H, WU F F, HU T Y, et al. Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(11): 1267-1278.
- [25] 骆开谋, 叶露. 无人机遥感技术及其在环境保护领域中的应用[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(2): 211-212. LUO K M, YE L. UAVRS and its applications in the field of environmental protection[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(2): 211-212.
- [26] 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98-106. LIU J G, ZHAO C J, YANG G J, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(24): 98-106.
- [27] 万炜, 肖生春, 陈小红, 等. 无人机遥感在野外植被盖度调查中的应用——以阿拉善荒漠区灌木为例[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 150-156. WAN W, XIAO S C, CHEN X H, et al. Application of unmanned aerial vehicles to field vegetation coverage survey: A study of shrubs on Alxa desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(9): 150-156.
- [28] 李双喜, 徐识溥, 刘勇, 等. 基于4G无线传感网络的大田土壤环境远程监测系统设计与实现[J]. 上海农业学报, 2018, 34(5): 105-110. LI S X, XU S P, LIU Y, et al. Design and implementation of remote monitoring system for soil environment in field based on 4G WSN[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2018, 34(5): 105-110.
- [29] 崔艳茹, 齐子丰. 基于ZigBee技术的无线传感器网络在环境监测中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(19): 23-24. CUI Y R, QI Z F. Application of wireless sensor network based on ZigBee technology in environmental monitoring[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2018(19): 23-24.
- [30] 苗春雷. 无线传感器网络在环境监测中的应用[J]. 环境与发展, 2017, 29(10): 144, 148. MIAO C L. Application of wireless sensor network in environmental monitoring[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(10): 144, 148.
- [31] 王旭东. 基于WSN的农田信息监测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. WANG X D. Design and implementation of farmland information monitoring system based on WSN[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [32] 沈益辉, 秦会斌. 基于Zigbee无线传感器网络的环境监测系统设计与实现[J]. 软件导刊, 2017, 16(12): 102-105. SHEN Y H, QIN H B. Design of environmental monitoring system based on Zigbee WSNs[J]. *Software Guide*, 2017, 16(12): 102-105.
- [33] 史舟, 郭燕, 金希, 等. 土壤近地传感器研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1274-1281. SHI Z, GUO Y, JIN X, et al. Advancement in study on proximal soil sensing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1274-1281.
- [34] 史舟, 徐冬云, 滕洪芬, 等. 土壤星地传感技术现状与发展趋势[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 79-92. SHI Z, XU D Y, TENG H F, et al. Soil information acquisition based on remote sensing and proximal soil sensing: Current status and prospect[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 79-92.
- [35] XU Y F, LI S H, YOU H K, et al. Retrieval of canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data based on the Monte Carlo method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 99: 1-5.
- [36] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260. SHI Z, LIANG Z Z, YANG Y Y, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 247-260.
- [37] 济南市大秦机电设备有限公司. 一种化学类环保分析仪器在线检测移动实验室系统: 201610004815. 6[P]. 2016-04-27. Jinan Daqin Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd. Mobile laboratory system for online detection of chemical environmental analysis instrument: 201610004815. 6[P]. 2016-04-27.
- [38] 东南大学. 天空地一体化土地数据获取系统和方法: 201510580782.5[P]. 2016-01-27. Southeast University. Space-Air-Ground integrated land data acquisition system and methods: 201510580782.5[P]. 2016-01-27.
- [39] 李河. 中国耕地质量评价和监测研究进展与展望[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(35): 14-16, 18. LI H. Advance and prospects on cultivated land quality evaluation and monitoring in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(35): 14-16, 18.
- [40] 史舟, 王乾龙, 彭杰, 等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(5): 978-988. SHI Z, WANG Q L, PENG J, et al. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2014, 44(5): 978-988.
- [41] ZHANG F, WANG G, HU Y, et al. Design of an integrated remote and ground sensing monitor system for assessing farmland quality[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 336.
- [42] 张飞扬, 胡月明, 陈联诚, 等. 耕地质量低空遥感-地面传感双重采集系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(3): 117-125. ZHANG F Y, HU Y M, CHEN L C, et al. Low altitude remote sensing-ground sensing double collection system for farmland quality[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41(3): 117-125.