

引用格式:付晶莹,彭婷,江东,等.草地资源立体观测研究进展与理论框架[J].资源科学,2020,42(10):1932-1943.[Fu J Y, Peng T, Jiang D, et al. Research progress and theoretical framework of multidimensional observation of grassland resources[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1932-1943.] DOI: 10.18402/resci.2020.10.10

草地资源立体观测研究进展与理论框架

付晶莹^{1,2},彭婷^{1,2},江东^{1,2},林刚^{1,2},边鹏³,韩昊⁴

(1.中国科学院地理科学与资源研究所,北京100101;2.中国科学院大学资源与环境学院,北京100049;3.中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心,呼和浩特010010;4.中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心,西宁810000)

摘要:真实准确地掌握草地基础数据,不仅是指导草地合理利用的基础,更是政府科学决策的重要依据。“星-空-地”一体化遥感观测技术应用为草地要素监测和草地植被生长过程的时空多维度、立体观测提供了新思路。本文通过梳理草地资源观测技术、要素指标与功能服务研究进展,围绕草地资源立体监测网络、要素指标体系以及应用服务需求与支撑决策等方面,提出了中国草地资源立体观测网络、指标要素与应用服务体系构建的技术思路。本文认为,未来应加强草地资源立体观测大数据平台建设,推进星基、空基遥感监测与地面监测大数据的深度融合与应用,提升对全国、区域、局域草地的自动化、全天候、立体化观测能力和多源数据获取能力,建立科学合理的草地资源智慧管理和决策支持系统工具,更好地为各级政府及相关部门制定草原保护制度建设及草业发展规划、决策及实施措施提供科学依据。

关键词:“星-空-地”一体化观测;全要素监测;草地资源;应用服务;辅助决策

DOI: 10.18402/resci.2020.10.10

1 引言

草地资源指生长多年生草本植物(或可食灌木)为主的、可供放养或割草饲养牲畜的土地。草地资源监测是及时对草地牧草以及草地上生长的动植物及其环境条件进行连续的现状调查和评估,有效的草地资源监测不仅是草地资源开发利用与管理的基础,也是政府科学决策的重要依据^[1]。近年来,由于受到人类活动和气候变化的影响,草地退化问题已成为了全球性的生态环境问题之一^[2,3]。这种情况在中国部分地区尤为严重,全国近90%的草地呈现出不同程度的退化,草原面积持续减少,具体表现在质量和产量的下降、生物多样性的减少以及草地荒漠化等问题^[4]。如何有效实施草地生态环境监测,控制和改善草地退化对中国草地资源管

理及草原生态环境建设具有重要的科学意义。传统的草地资源监测多采用地面调查技术手段,在草地资源观测和测量的基础上,对草地基况、生产能力、资源生态建设工程效益进行分析、评估,有效推动了中国草原生态环境监测工作的发展,但由于其手段单一、获取数据准确性差,阻碍了对草地土壤、水分、物种和草地退化沙化的更深入和更深层次的了解,严重影响了监测的质量;另外,由于科研、资源、草原、气象等多部门监测技术规范 and 监测指标不统一,造成监测数据也缺乏横向可对比性,信息整合与综合评价能力差,极大影响了监测支撑作用的发挥,造成了研究成果与实际应用需求仍存在较大差距^[5]。随着遥感技术的不断发展,时空高分辨率的影像数据为长时间序列和大区域尺度的草地

收稿日期:2020-08-05,修订日期:2020-09-17

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23000000);国家自然科学基金项目(41971250);中央高校基本科研业务费项目(2019QD01);全国自然资源要素综合观测体系规划与部署项目(DD20208063)。

作者简介:付晶莹,女,吉林磐石人,副研究员,研究方向为资源环境遥感监测、“三生”空间统筹优化。E-mail: fujy@igsrr.ac.cn

通讯作者:林刚,男,山东枣庄人,助理研究员,研究方向为资源环境可持续发展。E-mail: ling@lreis.ac.cn

2020年10月

退化监测提供了有力的技术支持。近期,在遥感平台和载荷技术的支撑下,“星基”“空基”“地基”等多平台、多尺度、多模式遥感技术手段为地表要素和过程的时空多维度、立体观测提供了新思路^[6,7]。新时期,草地资源监测工作将会对草原生态环境保护、维护草原生物多样性等生态文明建设工作具有重要的支撑作用^[8],但目前中国的草地资源监测工作仍存在多种问题亟待解决。因此,本文通过梳理草地资源观测技术、要素指标与功能服务研究进展,从草地资源立体监测网络、要素指标体系以及草地资源面向应用需求与支撑决策等方面入手,通过归纳总结的方式提出了中国草地资源立体观测网络、指标要素与应用服务体系构建的技术思路,以期为草地资源的保护与建设以及草原牧区生产、生活和生态的全面协调发展提供科学依据。

2 草地立体观测研究进展

2.1 观测技术

2.1.1 草地资源“星基”观测

草地资源的“星基”观测是指基于卫星遥感影像技术,通过遥感解译的方式开展草地资源动态监测与评价。国外草地资源卫星遥感技术的应用,最早可追溯至20世纪60年代,如美国、前苏联、加拿大、澳大利亚、新西兰等国率先将卫星资料用于草地植被的动态监测^[9-12],研究者们主要利用中分辨率的Landsat/MSS的CCT影像数据进行局部地区的草地监测,对于更大尺度的草地监测则利用低空间分辨率的NOAA气象卫星的CTT数据实现^[13,14]。随着卫星技术的发展,越来越多的高时空和光谱分辨率卫星影像数据被纳入草地观测的选择范围,如美国的Landsat/TM、TERRA/MODIS和NOAA/AVHRR、泰国的TIEOS以及法国的SPOT/VGT等,从250~8000 m的不同空间分辨率数据均在草地监测领域开始推广应用^[15],上述卫星基本实现了对不同尺度下的草原监测需求。

与国外发达国家相比,中国草地资源遥感监测技术应用起步较晚,但总体发展较快。学者们运用NOAA/AVHRR、Landsat/TM和MODIS卫星影像,重点开展了草地载畜量、生物量,植被覆盖度,草地退化与修复和动态监测评价等方面的研究工作:①草地载畜量、生物量估算。如刘东升^[16]利用NOAA

气象卫星估测草地地上生物量,采用气象卫星测值与地面测产同步进行的方法建立了估产模式。陈全功等^[17]利用NOAA/AVHRR卫星遥感资料进行草地草量和载畜量监测研究。②草地植被覆盖度监测。如陈梦蝶等^[18]利用Terra/MODIS植被指数产品和2005—2006年青海省草地调查资料,确定了草地地上生物量和植被盖度遥感反演模型,模拟分析了青海省鼠害发生风险、草地资源生物量以及植被盖度动态变化。③草地退化与修复及动态监测评价。王鹏新等^[19]基于Landsat卫星遥感影像分析了内蒙古锡林郭勒草原不同时期典型干草原草地的退化与恢复特征。邹亚荣等^[20]利用Landsat/TM卫星遥感数据,监测并分析了中国草地资源1995—2000年间的动态变化。结合地面调查数据,赵冰茹等^[21]利用TERRA/MODIS卫星遥感数据分析了内蒙古自治区锡林郭勒盟草地4种代表性草地植被指数的时空变化特征。安如等^[22]运用高光谱遥感数据,利用多端元混合像元分解技术提取了可食牧草、毒杂草以及裸土比例,结果表明高光谱遥感对草地退化探测具有良好的效果。相较于多光谱数据,高光谱数据凭借其丰富的光谱信息还能准确识别退化物种。

2.1.2 草地资源“空基”观测

草地资源“空基”观测方法主要是指利用无人机遥感技术进行草地资源动态观测。无人机遥感技术是利用无人机搭载高分辨CCD相机,并通过空中和地面系统自动控制拍摄和获取高清遥感影像的技术^[23]。无人机最早应用在军事侦查领域,随着软硬件技术的快速发展,无人机技术逐渐从军事领域扩展到民用、商用和科研领域^[24]。在草地监测的研究中,无人机以其机动灵活、高分辨率和成本相对载人飞机平台低廉等优势成为了近地遥感监测的有力工具^[25]。据文献调研显示,无人机遥感技术早期的研究内容主要集中在森林植被调查、作物产量监测方面。如Berni等^[26]使用搭载了多光谱成像传感器的无人机获取了地表反射率和温度图像,并利用植被指数、光化学反射率等估算了森林植被特征参数;Herwitz等^[27]测试了无人机在夏威夷种植园的慢飞行观测能力,结果表明无人机能够获取和传输高空间分辨率数字影像,从而实现区域农业资源

产量监测。

近年来,随着无人机遥感技术的运用逐渐成熟和不断创新,其应用范围逐步扩展到生物多样性监测与保护、作物病虫害监测、植被覆盖率监测、植被指数测定、草原物种分类等领域^[28]:①在作物病虫害监测方面,可利用搭载微型高光谱成像传感器的小型无人机监测云杉树皮甲虫的虫害发生情况^[29]。②在植被覆盖率监测方面,可利用无人机获取草原大样方数据,估算草地植被覆盖度的可行性以及植被覆盖度与生物量的相关性^[30]。如孙世泽^[31]利用多旋翼无人机搭载多光谱相机获取了高分辨率多光谱影像,结合草地上生物量实测数据和卫星遥感数据,确定了多种生物量和植被指数的最优估算模型,协同估算草地上生物量。蔡栋等^[32]利用2016—2017年甘南藏族自治州野外实测样方盖度数据和无人机照片提取的草地植被覆盖度数据,建立了基于不同遥感数据源草地植被覆盖度的回归模型并验证了其精度。③在植被指数测定方面:利用Landsat遥感影像和无人机多光谱影像数据,可以分析不同尺度下草地归一化植被指数的影响因子^[33]。④在草原物种分类方面:利用多旋翼无人机采集草原高光谱遥感图像,采用光谱变换方法增大草原物种的光谱差距,可以解决荒漠草原物种分类问题^[34]。

2.1.3 草地资源地面观测

草地资源“地面”观测方法主要是指样方法、实地考察法以及通过各种类型的地面监测网络对草地资源进行的调查和监测。

在样方法、实地考察法应用方面,2003年4月后,农业部及各省级行政区先后成立了草原监理中心和草原监理总站,在全国不同类型的草地上设置了3300多个样地,取得了近万个样方资料^[35]。张晓蕾等^[37]研究并分析了同心圆样线-样方法、Daubemire样线法、大样方-样线法和改进的巢式样方法对不同高寒草地植物多样性的监测效果和成本效率。王青钦等^[38]采用样方法、样线法和访问法调查了独山草地资源,并提出了其草地资源利用问题及其应对策略。

在地面监测网络应用方面,主要包括气象站监测网络和环境监测网络:①气象站监测网络由2300多个遍布全国各地的气象站构成,可以获取云量、

气压、风速、风向、温度、可见度、降水,太阳辐射等实时天气参数;②环境监测网络由土壤监测站、物候监测站、空气质量监测站、水文监测站等构成,主要涵盖生态系统要素监测和环境污染监测,收集并分析水生态、陆地生态、环境质量、环境污染以及生态环境要素的时空变化情况^[39]。地面监测网络的建设工作,极大推动了中国草原生态环境监测工作的研究进展,如利用农牧业气象观测站的农作物和牧草物候数据、生态气象观测站草地群落物候数据、生物量数据、气象数据及其他辅助基础数据,可探索农作物和牧草物候的时空变化特征及其不同气候和海拔高度区气候变化与物候的相互作用关系^[40]。

2.2 观测指标

2.2.1 气象要素

气象要素观测对于研究草地生态系统的气候特征及变化规律、水热环境、生物种群分布与发展等具有重要意义。“星-空-地”一体化立体观测网络,围绕草原小气候效应观测、草原的能量平衡观测、草原的水量平衡测定以及草原的动量平衡观测等技术要求,利用“星基”“空基”及“地基”监测手段互补、协同运行、交叉检验优势,可重点实现日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、光合有效辐射、有效积温、积雪持续时间、积雪深度等9类气象要素的自动观测,从而系统建立草原生态环境专业气象监测体系。其中,积雪对干旱半干旱高原草地而言是重要的水源,可以防止植被冻伤,因此,积雪持续时间、积雪深度是影响牧草生长的重要因素,研究草原植被覆盖度与积雪的响应关系及响应机制对于了解草原植被变化趋势具有重要的意义^[41,42]。通过上述指标内容,还可以进一步估算草地热量资源和草地气候区划的热量指标——草地活动积温和有效积温,进而预报牧草的物候期以及病虫害的发生趋势^[43,44]。

2.2.2 土壤要素

土壤要素观测是研究草地生态系统的土壤环境、植被类型及其生长发育状况的重要依据。“星-空-地”一体化立体观测网络,针对草甸、草原、草丛和稀疏草地,可获取包括土层平均厚度、土壤机械组成、土壤质地、土壤类型、土壤孔隙度、土壤容重、土壤pH值、土壤养分含量、土壤有机质含量、土壤

2020年10月

全氮、全磷、土壤重金属含量、土壤农药成分含量等要素指标^[45,46], 以实现草原土壤物理特性、草原旱情、以及草原土壤环境的监测, 从而确定土壤环境质量、污染程度及其变化趋势等。总体而言: ①土层平均厚度、机械组成、质地、土壤类型、孔隙度、土壤容重等指标可以反映土壤物理性质变化; ②土壤pH值、土壤养分含量、土壤有机质含量、土壤全氮、土壤全磷等是衡量土壤肥力的重要依据, 而土壤肥力直接影响草地牧草的生长和牧业的发展^[47]; ③土壤重金属含量和土壤农药成分含量又是土壤环境质量的重要指标^[48,49]。

2.2.3 生物要素

草原生物个体、种群以及群落对环境污染或变化具有极高的灵敏度, 生物要素监测是草原环境质量检测和评价的前提。“星-空-地”一体化立体观测网络应用于生物要素观测体系, 将多种卫星影像、无人机监测数据与地面监测数据相结合, 统筹考虑草原生态系统要素、草原动植物群落特征以及草原土壤微生物群落特征等, 重点监测草地高度、草地类型、草地盖度、牧草物候期、草地生物量、牧草养分、牧草干物质重量、畜群结构、载畜率、草地鼠害、草地虫害、微生物种类数量等关键要素。获取方式如下: 牧草高度、牧草物候期以及牧草产量可采用多期雷达和卫星遥感影像获得^[51-53], 用以研究牧草生长发育规律。牧草养分、干物质重量、畜群结构、载畜量、草地鼠害、虫害和微生物种类数量可通过地面观测手段获取^[54-57], 其中, 畜群结构、载畜量用来分析天然草场载畜能力, 而草地鼠害、虫害指标不仅加快了对草地资源的宏观监测速度, 而且能够快速、准确地反映草地鼠虫害的变化动态。

2.2.4 水环境要素

水环境要素观测是草地生态系统的水环境、水文调节、水循环过程研究的重要基础, 通过地面水文监测站可获取土壤水分含量、土壤水分特征参数、地表水水面蒸发量、水pH值、水中溶解氧、水中总氮、水中总磷、矿化度、地下水潜水水位、草地蒸散量等要素指标^[58]。总体而言: ①土壤水分含量和土壤水分特征参数可以用来监测土壤水环境, 指示草地土壤缺水情况, 预测草地旱情; ②地表水水面蒸发量、pH值、水中溶解氧、总氮、总磷、矿化度、地

下水潜水水位等指标可以反映地表水和地下水环境质量, 对于草地水资源利用、调配以及草地牧草种植规划等具有重要意义^[59]; ③草地蒸散量可以揭示草地牧草对水分的利用程度, 在草地水资源合理利用和节约用水方面有重要应用^[60]。

2.3 技术应用

2.3.1 草地资源区划

草地资源区划是研究草地资源和草地生产的区域化特点, 阐明不同地域内草地生产系统发展的规律和动向, 遵循因地制宜、分区指导原则拟定草地畜牧业生产方向和提高草地生产力的关键措施。其目的是合理布置和组织生产, 正确地采用草地科学技术, 按照自然和经济规律发展草地畜牧生产^[1,61]。“星基”“空基”及“地基”观测网络可为草地资源区划应用提供平台支撑与要素功能服务: ①在平台支撑层面: “星-空-地”一体化立体观测平台获得遥感影像, 结合实地调查方法可系统地了解区域草地类型空间分布和特征。如借助SPOT和TM影像, 采用典型样地和观察样地地面植被特征采集的方法, 选择有代表性地段布设调查样地, 可快速获得区域草地资源分布情况和类型特征信息; ②在要素服务层面: 温度和降水作为影响草地类型划分的重要指标, 影响草地类型在景观上的迁移, 即影响植被类型、生态系统的群落结构, 也常被用于草地类型划分的研究^[62-64]。如苏力德等^[65]采用内蒙古草地类型的Holdrige气候区划指标, 针对内蒙古草原区气候特征, 划分出了基于温度、降水和可能蒸散率所构成的内蒙古草地类型区划带, 为维护当地草地畜牧业的可持续发展和草地生态系统的健康提供了基础信息和科学依据; ③在功能应用层面, 基于“星-空-地”一体化立体观测大数据平台的草地类型区划成果可用于草地生态补偿研究, 如王重玲等^[66]基于宁夏生态功能区划, 划分了宁夏生态系统服务功能受益范围, 进而测算其生态系统服务价值并确定生态系统生态补偿标准。

2.3.2 草地植被覆盖度监测

植被覆盖度是指研究区域中地表部分的全部植物(包括叶、茎、枝等)的垂直投影面积占样地总面积的百分比, 是表征生态系统植被群落生长状况

及生态环境质量的重要参数,其值大小能直接反映出地区的生态状况^[67]。目前,对于草地植被覆盖度的估测主要有两种方法:地面测量法和遥感反演法。其中,地面测量法主要包括拍照法、采样法、仪器法和目估法等;遥感反演法则主要采用增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)构建植被覆盖度反演模型^[68]。“星基”“空基”及“地基”监测手段互补、协同运行,不仅覆盖面积广,且能频繁获取地表信息,可被广泛应用于区域尺度植被覆盖变化的动态监测研究。如利用TERRA/MODIS卫星遥感数据的图像红、近红外反射率合成所需要的植被指数,可计算NDVI值,并根据NDVI分级图、草原类型分布图和草原退化分级图,结合降水、气温资料,对天然草原植被长势的时间和空间变化特征和变化规律进行研究^[69]。

2.3.3 草地产草量估算

草地产草量是反映草原状况的最直接指标,能够代表草地生产力的基本水平,在很大程度上决定草地生态系统状况,对草地生态系统功能的强弱有很大的决定作用,详细、及时、准确地掌握草地产草量及其载畜平衡状况,是草地监测和预警的主要研究内容^[70]。利用“星-空-地”一体化立体观测网络提供的高质量、多粒度、标准化的遥感、土壤以及气象等多源数据,可以分析草地生产力不同时间尺度的演变特征及其与各类影响因素的相关性,并在此基础上构建产草量遥感估算模型,实现产草量的估算和预测。如通过综合运用GIS和遥感手段,结合野外实际调查数据、遥感数据及其他辅助数据,在草地NPP估算的基础上,刘海新^[71]系统分析了内蒙古草地生产力的时空演变特征及影响因素,并探讨了气温和降水对草地生产力的延迟性影响,完成了鲜草产草量的遥感估算和预测,为合理利用草地资源、正确指导畜牧业发展、实现草畜平衡的草原科学管理提供了数据支撑和决策依据。

2.3.4 草地可利用率确定

草地可利用率是指一定面积的草地可供家畜采食的牧草量占牧草产草量的比值,是衡量草地资源利用情况的一个重要指标,不同利用率对草地的可持续利用状态影响极大。利用“星-空-地”立体

观测网络多元感知系统分别对放牧行为和植被生长状况进行实时、动态地监测,并在此基础上,将放牧轨迹数据和遥感数据进行叠加,可对天然草地利用状况进行评估,为畜牧管理部门和牧主实施放牧管理和天然草地建设提供决策依据。如通过遥感估算模型可测算出产草量的时空分布和动态变化,而通过牧群轨迹数据可计算放牧行为的时空演变模式,应用无人机技术所获取的观测结果与植被群落多样性指数、牧草营养指标和土壤理化性质的相关关系,又可分析区域内放牧强度的分布趋势,进而系统评估天然草地可利用状况^[72,73],以提出精准解决方案进行放牧管理模式调整,为草原的生态保护、经济发展和牧区精准农业的推进提供科学参考。综上所述,新时期我国草地资源监测体系仍存在多种问题亟待解决。本文通过梳理草地资源观测技术、要素指标与功能服务研究进展,面向应用需求与支撑决策提出了中国草地资源立体观测理论框架。

3 草地立体观测观测理论框架

随着“星基”和“空基”遥感技术的快速发展和地面监测网络的稳步构建,草地资源观测技术正在迈入多源、多角度、自动化、立体化观测的新时代^[74]，“星-空-地”一体化的立体观测网络正在成为当前和今后草地资源监测的重要技术方向。

3.1 “星-空-地”一体化立体观测

“星-空-地”立体观测网络综合利用“星基”“空基”及“地基”平台等多元感知系统,实现对草地生态系统大气环境、土壤环境、生物环境、水环境等四大要素的天地空立体化、全方位、快速和实时探测^[75]。其发展思路是“建成一张网,形成两个体系,实施三大工程,构建四个中心”,即坚持以支撑服务草地资源管理为核心,建立草地资源立体监测网络,构建技术服务与业务应用两大体系,面向草地生态保护红线监管、草地生态环境综合立体遥感监测和草地生态环境遥感监测能力建设三大工程,形成数据管理、技术服务、业务应用与科学决策四个中心,为草地资源的生态文明建设与保护、草地资源的科学有效利用提供强有力的技术支持和信息服务^[74]。“星-空-地”一体化立体观测网络的应用基础在于建设基于3S技术和计算机网络技术的地理信息系统数

2020年10月

数据库平台,具体分为空间数据库平台和属性数据库平台,其目的在于实现“星-空-地”多源草地监测数据的输入、存储、管理、查询、分析等功能,从而实现多元数据的融合,为各级草地监测业务提供背景数据,并为草地资源的科学管理和决策分析提供有效平台^[76]。首先,将“星基”监测站、“空基”监测站与“地基”监测站相结合,可以提供一套高质量、多粒度、标准化的草牧业监测数据,为及时准确地掌握草原资源信息及牧场管理状况提供实时可靠的数据支撑;将多种卫星影像、无人机监测数据与地面监测数据相结合,可以实现草地资源管理从定性研究到定量分析的飞跃,完成草地资源研究时空的扩展和转移;其次,通过“星-空-地”立体观测网络,研发基于星载、高空球载、低空机载遥感成像和地基观测的星空地一体化信息连续获取系统,配合多尺度的草原生态参数遥感反演模型和草地生产力预测模型,又可实现典型牧区草地资源的实时监测、评估与预测。

3.2 “星-空-地”一体化立体观测理论框架与指标体系

“星-空-地”一体化的草地资源立体观测网络是草地资源全要素监测指标体系的重要设施基础,但草地资源监测的指标要素并不能直接服务于业务报告及决策支持。基于全要素观测网络提供的数据库基础和平台支撑,本文提出了涵盖草地资源区

划、草地植被覆盖度、草地产草量、牧草干鲜比和草地可利用率的六大类草地资源业务指标体系,从应用需求层面阐述草地生态系统环境和功能定量评价和分析的实现途径,以有效支撑草原利用程度、草畜平衡、草原保护建设、草原退化程度、草地生态补偿等草地资源管理决策支持服务工作(图1)。

(1)“星-空-地”草地资源立体观测网络作为草地资源全要素监测指标体系的设施基础,可提供一套高质量、多粒度、标准化的草牧业监测数据,为及时准确地掌握草原资源信息及牧场管理状况提供实时可靠的数据支撑。

(2)草地资源全要素监测指标体系作为草地资源业务指标体系的数据基础,可提供草地资源各类业务指标计算的基础数据,而草地资源业务指标体系则是草地资源全要素监测指标体系构建的方向和依据。

(3)草地资源业务指标体系通过草地资源区划、草地植被覆盖度计算、草地产草量估算、牧草干鲜比测算、草地可利用率估算等业务功能的实现,可以从业务层面对草地生态系统的环境和功能进行定量评价和分析,从而为从决策层面掌握草地利用程度、草畜平衡、草地保护建设、草地退化程度、草地生态补偿等草地资源利用管理状况提供真实可靠的业务资料^[77,78]。

面向草地资源监测的目标和应用需求,结合生

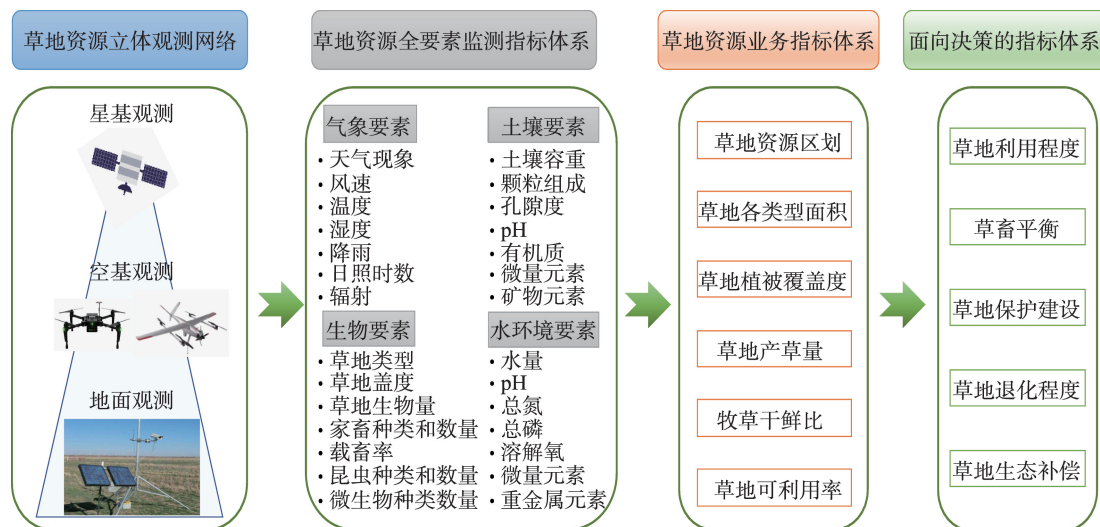


图1 草地资源立体观测框架体系

Figure 1 Three-dimensional monitoring network and monitoring indicator system of grassland resources

态学、生物学和环境科学原理,“星-空-地”一体化立体观测网络通过综合利用“星基”“空基”及“地基”平台等多元感知系统,可实现对草地生态系统大气环境、土壤环境、生物环境和水环境等四大要素的立体化、全方位、快速的实时监测,以确定一系列可以测量和描述草地生态系统结构与水热条件、物质循环、能量流动、生物量与生产力以及植物、动物、微生物的种内和种间关系的定量或定性指标,形成草地资源全要素监测指标框架体系(图2)。

草地资源合理、有效的管理和利用不仅建立在草地资源全要素观测网络之上,更建立在科学的草地资源应用服务和决策支撑上。依托“星-空-地”一体化立体观测平台,谋划草地生态保护建设大棋局,草地资源的应用服务指标体系应基于全要素观测网络提供的数据基础,面向草地多方面功能需求,发展成为能够为未来草区、牧区长期可持续发展提供管理决策的有效工具。除了传统技术应用外,依托“星-空-地”一体化立体观测平台,综合应用遥感及GIS技术,结合样地实测数据,并根据地形地貌特征、草地类型及生长环境的特点,还可实现草地植被类型面积的核算、载畜量和牧草干鲜比的估算以及牧草长势情况的监测等应用服务功能,形成科学合理的草地资源应用服务框架体系。

4 草地立体观测未来展望

利用“星-空-地”一体化的立体观测网络进行草地资源监测正在成为当前和今后草地资源管理的重要技术方向。本文通过梳理草地资源观测技术、要素指标与功能服务研究进展,从草地资源立

体监测网络、要素指标体系以及草地资源面向的应用需求与支撑决策等方面入手,提出了中国草地资源立体观测网络及观测指标体系构建的技术思路。

中国草地资源大数据监测网络的构建工作正处于起步阶段,许多业务工作存在不足,遥感监测系统的综合性、立体观测能力、产业化程度等有所欠缺。如在“星基”遥感监测方面,国产民用卫星在时空分辨率、光谱段和可用性等方面无法满足草地资源监测业务应用数据的采集需求;在“空基”遥感监测方面,虽然无人机在生态环境监测的研究工作中已受到广泛重视和应用,但由于其较高的操作难度和经济成本,在实际监测工作中应用范围还不够宽,实用功能还不够丰富;在“地基”监测方面,仍然以实验性、考察性为主,全自动地面监测站仅在气象领域和水文观测领域应用较多,在土壤和生物要素监测方面应用不足。另外,“星-空-地”一体化监测网络将带来海量的多源草地监测数据,这对数据的运输、存储、处理和应用都带来了巨大挑战,如何统一数据模型和数据标准,实现地理网格一体化管理、多源异构大数据一体化组织和分布式文件存储等关键技术,成为目前迫切需要解决的问题。最后,草地业务部门收集数据的技术路线、标准以及应用目标各不相同,难以实现大数据真正的融合、集成、共享,如何解决草地资源大数据的流动性问题,挖掘草地资源大数据的应用价值,也是当下面临的巨大难题。

今后,需要集聚政府与社会、高等院校和科研单位等多方力量,加强草地资源立体监测大数据平

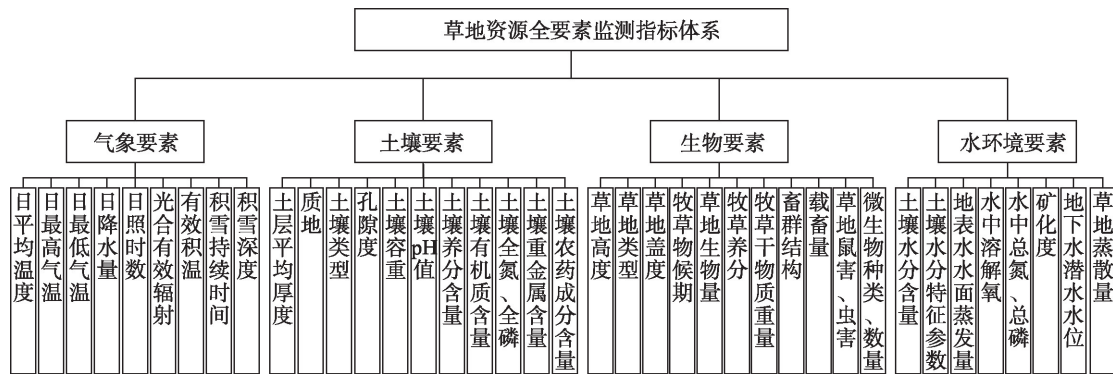


图2 “星-空-地”一体化立体观测草地资源全要素监测指标体系

Figure 2 Satellite-aerial-ground based integrated multidimensional observation all-element monitoring indicator system of grassland resources

2020年10月

台建设,充分整合和利用现有的社会资源和硬件设施,加快“星-空-地”立体观测网络的构建,加速推进星基、空基遥感监测与地面监测大数据的深度融合与应用,研发具有数据处理、时空分析、情景模拟、成果展示、问题诊断与预警调控功能集成的可视化支持平台,统筹草地资源区划、草地植被覆盖度计算、草地产草量估算、牧草干鲜比测算、草地可利用率估算等应用服务功能,在提升对全国、区域、局域草地的自动化、全天候、立体化观测能力和多源数据获取能力的同时,实现对草地资源区划及面积、草地资源利用方式及强度、草地自然灾害等方面的现状与动态进行长期的监测评价与预警,形成多方统一、达成共识的发展目标和发展蓝图,更好地为各级政府及相关部门制定草地资源保护与建设及草业发展规划、决策及实施措施提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 孙鸿烈. 中国资源科学百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2000. [Sun H L. China Encyclopedia of Resources Science [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2000.]
- [2] Zhang R P, Liang T G, Guo J, et al. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2888–2888.
- [3] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 236–244.
- [4] 姚润丰. 我国90%的天然草原已出现不同程度退化[J]. 草业科学, 2003, 20(12): 83–85. [Yao R F. 90% of the natural grassland in China has been degraded to varying degrees[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(12): 83–85.]
- [5] 任鹏. 基于GIS的锡林郭勒草地资源监测系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012. [Ren P. Research on the Monitoring System of Xilinguole Grassland Resource Based on GIS[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.]
- [6] 郭争强. 基于深度学习的草地变化监测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. [Guo Z Q. A Study of Grassland Change Monitoring Based on Deep Learning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.]
- [7] Zeng N, He H L, Ren X L, et al. The utility of fusing multi-sensor data spatio-temporally in estimating grassland aboveground biomass in the Three-River Headwaters region of China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(18): 7068–7089.
- [8] 柴勇. 草原监测工作对生态文明建设的促进作用探究[J]. 甘肃畜牧兽医, 2018, 48(9): 84–85. [Chai Y. Study on the promotion of grassland monitoring to ecological civilization construction[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary, 2018, 48(9): 84–85.]
- [9] Friedl M A, Michaelsen J, Davis F W, et al. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1401–1420.
- [10] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, et al. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(18): 3519–3535.
- [11] Ritchie J C, Everitt J H, Escobar D E, et al. Airborne laser measurements of rangeland canopy cover and distribution[J]. Journal of Range Management, 1992, 45(2): 189–193.
- [12] Tueller P T. Remote-sensing technology for rangeland management applications[J]. Journal of Range Management, 1989, 42(6): 442–453.
- [13] 韩利昌, 吕新龙. 羊草地上生物量的遥感估产及其不同步的修正[J]. 东北师大学报(自然科学版), 1992, (2): 99–106. [Han L C, Lv X L. Yield estimation and revision of no synchronous to the above ground biomass of *Leymus chinensis* with remote sensing method[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 1992, (2): 99–106.]
- [14] 韩广, 色音巴图. 东北平原西部低地草甸的遥感估产模型研究[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(2): 23–28. [Han G, Se Y B T. A study on the mathematical model of remote sensing estimation yield for lowland meadow in the western part of Northeast Plain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1996, 11(2): 23–28.]
- [15] 董建军, 牛建明, 张庆, 等. 基于多源卫星数据的典型草原遥感估产研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(6): 64–69 [Dong J J, Niu J M, Zhang Q, et al. Estimation of primary productivity of typical grasslands based on multi-source satellite data[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(6): 64–69.]
- [16] 刘东升. 锡林郭勒干草原地上现存生物量与气象卫星测值关系的初步研究[J]. 内蒙古草业, 1989, (3): 36–42. [Liu D S. Preliminary study on the relationship between aboveground biomass and meteorological satellite measurements in Xilinguole Steppe[J]. Inner Mongolia Prataculture, 1989, (3): 36–42.]
- [17] 陈全功, 卫亚星, 梁天刚. 使用NOAA/AVHRR资料进行牧草产量及载畜量监测的方法研究[J]. 草业学报, 1994, 3(4): 50–60. [Chen Q G, Wei Y X, Liang T G. Reseaches on monitoring method for grassland biomass yield and carrying capacity by using NOAA/AVHRR information[J]. Acta Prataculturae Sinica, 1994, 3(4): 50–60.]
- [18] 王鹏新, 陈晓玲, 李飞鹏. 典型干草原退化草地的时空分布特征

- 及其动态监测[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 92-99. [Wang P X, Chen X L, Li F P. A study on dynamic monitoring rangeland regradation and its distribution in the Xilingol Plateau's dry steppe[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 92-94.]
- [19] 邹亚荣, 张增祥, 周全斌, 等. 遥感与GIS支持下的中国草地动态变化分析[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 42-47. [Zou Y R, Zhang Z X, Zhou Q B, et al. Analysis of grassland dynamic in China based on RS and GIS[J]. Resources Science, 2002, 24(6): 42-47.]
- [20] 赵冰茹, 刘闯, 王晶杰, 等. 锡林郭勒草地MODIS植被指数时空变化研究[J]. 中国草地学报, 2004, (1): 1-8. [Zhao B R, Liu C, Wang J J, et al. Spatial and temporal change of MODIS-NDVI in Xilinguole Grassland[J]. Grassland of China, 2004, (1): 1-8.]
- [21] 陈梦蝶, 黄晓东, 侯秀敏, 等. 青海省草原鼠害区域草地生物量及盖度动态监测研究[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 247-256. [Cheng M D, Huang X D, Hou X M, et al. Dynamic monitoring of biomass and vegetation coverage in rodent damaged grassland regions of Qinghai Province, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 247-256.]
- [22] 安如, 陆彩红, 王慧麟, 等. 三江源典型区草地退化 Hyperion 高光谱遥感识别研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(3): 399-405. [An R, Lu C H, Wang H L, et al. Remote sensing identification of rangeland degradation using hyperion hyperspectral image in a typical area for Three-River Headwater region, Qinghai, China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(3): 399-405.]
- [23] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513. [Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505-513.]
- [24] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.
- [25] 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用[J]. 地理科学进展, 2007, (1): 1-16. [Fu B J, Niu D, Yu G R. The roles of ecosystem observation and research network in Earth System Science[J]. Progress in Geography, 2007, (1): 1-16.]
- [26] Berni J A J, Zarco-Tejada P J, Suarez L, et al. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 722-738.
- [27] Herwitz S R, Johnson L F, Dunagan S E, et al. Imaging from an unmanned aerial vehicle: Agricultural surveillance and decision support[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 49-61.
- [28] 王俊丽, 任世奇, 张忠华, 等. 基于文献计量评价的无人机生态遥感监测研究进展[J]. 热带地理, 2019, 39(4): 616-624. [Wang J L, Ren S Q, Zhang Z H, et al. Research progress on unmanned aerial vehicle for ecological remote sensing monitoring based on bibliometric assessment[J]. Tropical Geography, 2019, 39(4): 616-624.]
- [29] Nasi R, Honkavaara E, Lyytikäinen-Saarenmaa P, et al. Using UAV-Based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level[J]. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15467-15493.
- [30] 刘艳慧, 蔡宗磊, 包妮沙, 等. 基于无人机大样方草地植被覆盖度及生物量估算方法研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2023-2032. [Liu Y H, Cai Z L, Bao N S, et al. Research of grassland vegetation coverage and biomass estimation method based on major quadrat from UAV photogrammetry[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11): 2023-2032.]
- [31] 孙世泽. 基于无人机多光谱数据的天然草地生物量估算方法研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. [Sun S Z. Study on Estimation Method of Natural Grassland Biomass, Based on UAV Multi-spectral data[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.]
- [32] 蔡栋, 李文龙, 朱亚莉, 等. 基于多源数据的甘南草地植被覆盖度遥感监测研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 373-379. [Cai D, Li W L, Zhu Y L, et al. Remote sensing monitoring of vegetation coverage in Gannan Grassland based on multi-source data[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(3): 373-379.]
- [33] 潘影, 张燕杰, 武俊喜, 等. 基于遥感和无人机数据的草地NDVI影响因子多尺度分析[J]. 草地学报, 2019, 27(6): 1766-1773. [Pan Y, Zhang Y J, Wu J X, et al. Multi-scales analysis of the impacting factors of grassland NDVI based on remote sensing and unmanned aerial vehicle data[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6): 1766-1773.]
- [34] 杨红艳. 基于无人机高光谱遥感的荒漠草原物种分类研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [Yang H Y. Classification Study of Desert Steppe Species Based on UAV Hyperspectral Remote Sensing[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.]
- [35] 齐景发. 贯彻落实《草原法》依法强化草原管理[J]. 草业科学, 2003, 20(4): 1. [Qi J F. Implement the grassland law and strengthen grassland management according to law[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(4): 1]
- [36] 陈全功. 中国草原监测的现状与发展[J]. 草业科学, 2008, (2): 29-38. [Chen Q G. Current status and development of grassland monitoring in China[J]. Pratacultural Science, 2008, (2): 29-38.]
- [37] 张晓蕾, 董世魁, 郭贤达, 等. 青藏高原高寒草地植物多样性调查方法的比较[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3568-3574.

2020年10月

- [Zhang X L, Dong S K, Guo X D, et al. Comparison of different sampling techniques for alpine grassland plant diversity on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3568-3574.]
- [38] 王青钦, 罗江红, 陈昌国, 等. 独山县草地资源调查研究[J]. *农技服务*, 2017, 34(18): 130. [Wang Q Q, Luo J H, Chen C G, et al. Investigation on grassland resources in Dushan County[J]. *Agricultural Technology Service*, 2017, 34(18): 130.]
- [39] 胡沅, 成丹, 王剑, 等. 遥感卫星在生态环境监测领域的应用满足度分析[J]. *卫星应用*, 2014, (8): 56-64. [Hu Y, Cheng D, Wang J, et al. Application satisfaction analysis of remote sensing satellite in ecological environment monitoring[J]. *Satellite Application*, 2014, (8): 56-64.]
- [40] 王力. 青藏高原东北部农作物与牧草物候特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Wang L. Phenological Characteristics of Crops and Forages and Their Responses to Climate Change in the Northeast of Qinghai Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]
- [41] 李晨昊. 蒙古高原积雪变化及对草地植被物候影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019. [Li C H. Study on the Variation of Snow Cover and Its Impact on Grassland Vegetation Phenology in Mongolia Plateau[D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2019.]
- [42] 尹航. 青藏高原地区积雪与植被NPP变化响应遥感诊断[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Yin H. Study on Interaction Remote Sensing Diagnosis Between Snow and NPP in Tibetan Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [43] 吕金莹, 闫超, 贾天宇, 等. 松嫩平原活动积温变化及其对作物产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3349-3356. [Lv J Y, Yan C, Jia T Y, et al. The variation of accumulated temperature in Songnen Plain and its impact on crop yield[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3349-3356.]
- [44] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型[J]. *植物保护*, 2019, 45(5): 18-26. [He L M, Ge S S, Chen Y C, et al. The developmental threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of developmental duration of fall armyworm, *spodoptera frugiperda*[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(5): 18-26.]
- [45] 王晓蕾. 基于RS与GIS的白沙灌区土壤墒情监测系统[D]. 郑州: 郑州大学, 2011. [Wang X L. Soil Moisture Monitoring System in Baisha Irrigation District Based on Remote Sensing and GIS[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.]
- [46] 加那尔别克·西里甫汗, 张霖琳, 滕恩江, 等. 电感耦合等离子体质谱法在土壤环境监测中的应用及进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(10): 1799-1804. [Jianaerbekie X L F H, Zhang L L, Teng E J, et al. Application and progress of inductively coupled plasma mass spectrometry in soil environmental monitoring[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(10): 1799-1804.]
- [47] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. *土壤与环境*, 2002, (2): 202-205. [Luo D Q, Bai J, Xie D T. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, (2): 202-205.]
- [48] 李卫江, 吴永兴, 茅国芳. 基于WebGIS的基本农田土壤环境质量评价系统[J]. *农业工程学报*, 2006, (8): 59-63. [Li W J, Wu Y X, Mao G F. WebGIS-based information system for evaluation of soil environment in prime farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, (8): 59-63.]
- [49] 高怀友, 赵玉杰, 师荣光, 等. 区域土壤环境质量评价基准研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(Z1): 342-345. [Gao H Y, Zhao Y J, Shi R G, et al. Study on the reference values for regional soil environment quality assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Z1): 342-345.]
- [50] Spagnuolo O S B, Jarvey J C, Battaglia M J, et al. Mapping Kenyan Grassland heights across large spatial scales with combined optical and radar satellite imagery[J]. *Remote Sensing*, 2020, DOI: 10.3390/rs12071086.
- [51] 周舆, 李素英, 杨秀影, 等. 锡林浩特典型草原地区牧草优势种类的品质研究[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 102-110. [Zhou Y, Li S Y, Yang X Y, et al. Study on the quality of dominant types of forage in typical steppe area of Xilinhot[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 102-110.]
- [52] 孙秀云, 刘海新, 赵玉玲, 等. 锡林郭勒盟草地物候期的时空演变及其对气候的响应[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 79-82. [Sun X Y, Liu H X, Zhao Y L, et al. Spatio-temporal evolution of grassland phenology and its response to meteorological factors in Xilinguole League[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 36(2): 79-82.]
- [53] 张双丽. 新疆产草量遥感估算与牧草长势监测研究及IDL实现[D]. 西安: 长安大学, 2018. [Zhang S L. Remote Sensing Estimation of Grass Yield and Monitoring of Forage Growth in Xinjiang and Implementation of IDL[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.]
- [54] 王向涛, 陈懂懂, 李奇, 等. 青海湖南岸天然草场牧草生产力和养分季节动态[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 199-203. [Wang X T, Chen D D, Li Q, et al. Seasonal dynamics of grass productivity and nutrients of natural grazing pasture on the southern bank of the Qinghai Lake[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, 55(2): 199-203.]
- [55] 宋仁德, 汪永洲, 李国梅, 等. 玉树州畜种畜群结构调查与对策初探[J]. *家畜生态学报*, 2014, 35(2): 53-57. [Song R D, Wang Y Z, Li G M, et al. Preliminary study and analysis of livestock breed

- and structure in Yushu Prefecture[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2014, 35(2): 53–57.]
- [56] 薛睿, 郑淑霞, 白永飞. 不同利用方式和载畜率对内蒙古典型草原群落初级生产力和植物补偿性生长的影响[J]. *生物多样性*, 2010, 18(3): 300–311. [Xue R, Zheng S X, Bai Y F. Impacts of grazing intensity and management regimes on aboveground primary productivity and compensatory growth of grassland ecosystems in Inner Mongolia[J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(3): 300–311.]
- [57] 王玮, 冯琦胜, 于惠, 等. “3S”技术在草地鼠虫害监测与预测中的应用[J]. *草业科学*, 2010, 27(3): 31–39. [Wang W, Feng Q S, Yu H, et al. Application of “3S” technology on monitoring and prediction of the grassland rodents and insects[J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(3): 31–39.]
- [58] 张洋洋, 赵建平, 徐娟娟. 基于物联网技术的水文监测系统研究[J]. *通信技术*, 2012, 45(4): 108–111. [Zhang Y Y, Zhao J P, Xu J J. Research of IoT-based hydrology monitoring system[J]. *Communications Technology*, 2012, 45(4): 108–111.]
- [59] 朝伦巴根, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 人工草地牧草优化种植结构和地下水资源可持续利用[J]. *农业工程学报*, 2006, (2): 68–72. [Chao L B G, Jia D B, Gao R Z, et al. Optimum grass growing pattern of artificial grassland and sustainable utilization of water resources[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, (2): 68–72.]
- [60] 韩建国, 潘全山, 王培. 不同草种草坪蒸散量及各草种抗旱性的研究[J]. *草业学报*, 2001, (4): 56–63. [Han J G, Pan Q S, Wang P. A study on the evapotranspiration and drought resistance of turf-grass species[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, (4): 56–63.]
- [61] 郭孝, 李黎, 王成章, 等. 河南省天然草地资源区划的研究[J]. *草地学报*, 2019, 27(3): 719–727. [Guo X, Li L, Wang C Z, et al. Studies on Henan Province rangeland resource regional planning [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 719–727.]
- [62] 刘洪, 郭文利, 权维俊. 内蒙古草地类型与生物量气候区划[J]. *应用气象学报*, 2011, 22(3): 329–335. [Liu H, Guo W L, Quan W J. Climatic division of the types and yields of grassland in inner mongolia[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(3): 329–335.]
- [63] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统[J]. *第四纪研究*, 1993, (2): 157–169. [Zhang X S. A vegetation-climate classification system for global change studies in China[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, (2): 157–169.]
- [64] 巩祥夫, 刘寿东, 钱拴. 基于 Holdridge 分类系统的内蒙古草原类型气候区划指标[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(3): 384–387. [Gong X F, Liu S D, Qian S. Climatic distribution indicators of Inner Mongolia grassland based on holdridge classification system [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(3): 384–387.]
- [65] 苏力德, 杨劫, 万志强, 等. 内蒙古地区草地类型分布格局变化及气候原因分析[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(2): 139–148. [Su L D, Yang J, Wan Z Q, et al. Climate change and its impacts on distribution pattern of grassland types in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(2): 139–148.]
- [66] 王重玲, 朱志玲, 王梅梅, 等. 基于生态服务价值的宁夏隆德县生态补偿研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 208–212. [Wang C L, Zhu Z L, Wang M M, et al. Research for the ecological function regionalization of ecological compensation based on ecological service value: An example of Longde County in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1): 208–212.]
- [67] 陈建军, 宣树华, 任世龙, 等. 疏勒河上游高寒草地植被盖度反演及精度评价[J]. *草业科学*, 2014, 31(1): 56–65. [Chen J J, Yi S H, Ren S L, et al. Retrieval of fractional vegetation cover of alpine grassland and the efficiency of remote sensing retrieval in the upper of Shule River Basin[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(1): 56–65.]
- [68] 宋清洁, 崔霞, 张瑶瑶, 等. 基于小型无人机与 MODIS 数据的草地植被覆盖度研究以甘南州为例[J]. *草业科学*, 2017, 34(1): 40–50. [Song Q J, Cui X, Zhang Y Y, et al. Grassland fractional vegetation cover analysis using small UAVs and MODIS: A case study in Gannan Prefecture[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(1): 40–50.]
- [69] 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于 MODIS/NDVI 的锡林郭勒草原植被变化及其归因[J]. *资源科学*, 2019, 41(7): 1374–1386. [A R, Bi Q G, Dong Z H. Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS/NDVI in Xilinguole, China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1374–1386.]
- [70] 王涛. 基于 RS 和 GIS 的西藏草地产草量评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. [Wang T. Evaluation on Grassland Yield in Tibet Based on RS and GIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.]
- [71] 刘海新. 内蒙古草地生产力时空分析及产草量遥感估算和预测[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019. [Liu H X. Spatiotemporal Analysis of Grassland Productivity and Estimation and Prediction of Grassland Yield by Remote Sensing in Inner Mongolia[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.]
- [72] 申波. 无人机技术评估相对放牧强度分布趋势初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Shen B. Preliminary Study on the Distribution Trend of Relative Grazing Intensity in UAV Technology Assessment[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]
- [73] 江红红. 基于 3S 技术的天然草地利用评估方法研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019. [Jiang H H. Study on Evaluation Method of Natural Grassland Utilization Based on 3S Technology[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.]

2020年10月

- [74] 张建辉, 吴艳婷, 杨一鹏, 等. 生态环境立体遥感监测“十四五”发展思路[J]. 环境监控与预警, 2019, 11(5): 8-12. [Zhang J H, Wu Y T, Yang Y P, et al. Development thought of ecological environment three-dimensional remote sensing monitoring in the 14th Five-Year Plan[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(5): 8-12.]
- [75] 孙中平, 申文明, 张文国, 等. 生态环境立体遥感监测大数据顶层设计研究[J]. 环境保护, 2020, 48(3): 56-60. [Sun Z P, Shen W M, Zhang W G, et al. Study on top design of big data in stereoscopic remote sensing monitoring on ecology and environment[J]. Environmental Protection, 2020, 48(3): 56-60.]
- [76] 刘路路, 张爱武, 张希珍, 等. 草原多源遥感数据管理系统设计[J]. 测绘科学技术, 2019, 7(4): 186-194. [Liu L L, Zhang A W, Zhang X Z, et al. Design of grassland multi-source remote sensing data management system[J]. Geomatics Science and Technology, 2019, 7(4): 186-194.]

Research progress and theoretical framework of multidimensional observation of grassland resources

FU Jingying^{1,2}, PENG Ting^{1,2}, JIANG Dong^{1,2}, LIN Gang^{1,2}, BIAN Peng³, HAN Hao⁴

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, China; 4. Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Xining 810000, China)

Abstract: Acquisition of accurate basic data of grassland resources is not only the foundation for the rational use of grassland, but also an important basis for government decision making. Satellite-aerial-ground based dynamic observation system provides new ways for the multidimensional spatiotemporal observation of the growth process and other parameters of grasslands. Based on the research progress on technologies, indicators, and application services of grassland resources observation, this study provided a technical framework for the multidimensional observation network and its indicators system. We propose that the grassland observation system should strengthen the construction of the three-dimensional monitoring big data platform, and pay more attention to data fusion and data application of satellite- and aerial- based remote sensing monitoring data and ground monitoring data, aiming to improve the ability for automated, all-weather, three-dimensional observation and data acquisition at the national, regional, and local scales. The results of this study may provide a reference for the protection and construction of grasslands and the planning, decision making, and implementation of grassland and grazing industrial development by building a scientific and reasonable grassland management and decision support system.

Key words: satellite-aerial-ground based dynamic observation system; all-element observation; grassland resource; application server; decision support