

DOI: 10.5846/stxb201803300694

韩东, 王浩舟, 郑邦友, 王锋. 基于无人机和决策树算法的榆树疏林草原植被类型划分和覆盖度生长季动态估计. 生态学报, 2018, 38(18): 6655-6663.

Han D, Wang H Z, Zheng B Y, Wang F. Vegetation type classification and fractional vegetation coverage estimation for an open elm (*Ulmus pumila*) woodland ecosystem during a growing season based on an unmanned aerial vehicle platform coupled with decision tree algorithms. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6655-6663.

基于无人机和决策树算法的榆树疏林草原植被类型划分和覆盖度生长季动态估计

韩 东¹, 王浩舟^{1,2}, 郑邦友³, 王 锋^{1,*}

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

2 The Faculty of Forestry & Environmental Management, University of New Brunswick, Fredericton, NB E3B 5A3, Canada

3 CSIRO Agriculture and Food, Queensland Biosciences Precinct 306 Carmody Road, St Lucia, 4067, QLD, Australia

摘要: 植被覆盖度是评估生态环境质量与植被生长的重要指标,也是全球众多陆面过程模型和生态系统模型中表达植被动态的重要参数。卫星遥感和地面测量是估算植被覆盖度的常见方法。然而,如何精确估计榆树疏林草原上木本、草本不同类型植被的覆盖度仍然具有挑战性。无人机飞行系统有效的补充了区域尺度低空间分辨率的卫星遥感影像与样地尺度实地调查之间的缺口,为精确的监测、评估疏林草原的植被动态提供了新途径。利用无人机监测平台和决策树算法构建了一套快速、准确、自动获取景观尺度植被类型和估算植被覆盖度的自动化工具,以浑善达克沙地榆树疏林草原为对象,应用无人机监测平台对榆树疏林草原长期定位监测大样地 2017 年生长季植被状况进行 7 次监测。结果表明:1) 无人机植被监测平台数据飞行高度 100 m,获取的样地数字正射影像空间分辨率为 2.67 cm/像元,远高于高分卫星影像,利用决策树算法基于数字正射影像可以实现自动划分榆树疏林草原木本和草本植被类型和估算植被覆盖度;2) 生长季内榆树疏林草原木本植被覆盖度为 $(19 \pm 2)\%$,草本植被覆盖度为 $(50 \pm 8)\%$,植被总覆盖度为 $(69 \pm 9)\%$,相对于木本植被,草本植被生长季内盖度变幅较大;3) 在整个生长季中,木本植被和草本植被对植被总覆盖度的平均贡献率分别为 27% 和 73%,草本植被对植被总盖度的贡献远大于木本植被,榆树疏林草原植被的盖度主要受草本植被的影响。本研究证明无人机监测平台是一种高效、准确的植被监测工具,结合机器学习算法,实现了景观尺度植被类型的自动划分和不同类型植被覆盖度快速获取;在浑善达克沙地榆树疏林草原地区首次获取了木本植被和草本植被覆盖度的生长季动态。该平台未来可应用于各种类型生态系统植被类型划分、监测和评估。

关键词: 浑善达克沙地;无人机监测平台;机器学习;正射影像;模式识别

Vegetation type classification and fractional vegetation coverage estimation for an open elm (*Ulmus pumila*) woodland ecosystem during a growing season based on an unmanned aerial vehicle platform coupled with decision tree algorithms

HAN Dong¹, WANG Haozhou^{1,2}, ZHENG Bangyou³, WANG Feng^{1,*}

1 Institute of Desertification Studies Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 The Faculty of Forestry & Environmental Management, University of New Brunswick, Fredericton, NB E3B 5A3, Canada

3 CSIRO Agriculture and Food, Queensland Biosciences Precinct 306 Carmody Road, St Lucia, 4067, QLD, Australia

Abstract: Fractional vegetation coverage (FVC) is an important indicator to assess ecological environments and vegetation

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500801, 2017YFC0503804);国家自然科学基金项目(31570710);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金青年人才项目(CAFYBB2017QC007)

收稿日期:2018-03-30; 修订日期:2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangfeng@caf.ac.cn

growing. It is also an important parameter in many land surface and ecological models. It is generally estimated by satellite-based remote sensing and ground investigation. However, it is challenging to precisely estimate the FVC of woody and herbaceous plants in elm sparse forest grasslands. Unmanned aerial systems (UAS) provide a solution for effectively bridging the gap between satellite-based remote sensing and field-based measurements. The purpose of this study was to propose an integrative tool for quickly, accurately, and automatically classifying the vegetation types and estimating FVC by coupling a UAS monitoring platform with decision tree algorithms. We applied this tool to observe the vegetation dynamics in an elm (*Ulmus pumila*) sparse forest grassland ecosystem (ESFOGE) plot during a growing season in 2017. The spatial resolution of the digital orthophoto map (DOM) derived from UAS was 2.67 cm/pixel with UAV flights at a height of 100 m. The woody and herbaceous plants of the ESFOGE plot were classified and their FVC were estimated as $(19 \pm 2)\%$ and $(50 \pm 8)\%$, respectively, on the DOM by decision tree algorithms. The FVC variation of herbaceous plants was larger than that of woody plants during a growing season. The FVC of the ESFOGE plot was $(69 \pm 9)\%$. The contribution of woody and herbaceous plants to vegetation coverage was 27% and 73%, respectively. The FVC of the ESFOGE-plot was more influenced by herbaceous plants. Overall, this research proved that a UAS monitoring platform is an effective tool for observing the vegetation status at a landscape scale. It automatically and quickly classified the vegetation type and estimated the FVC by coupling with decision tree algorithms. To our knowledge, it is the first time that the FVC dynamics of woody and herbaceous plants were derived from a UAS platform during a growing season in the ESFOGE. This UAS platform can be applied to monitor and evaluate the vegetation status in hard-to-reach areas in the future.

Key Words: Otindag sandyland; unmanned aircraft vehicle platform; machine learning; digital orthophoto map; pattern recognition

植被盖度作为地表植物群落直观定量化的功能指标,是描述植被动态的基本指标^[1-3],在景观、区域和全球众多生态模型中得到广泛应用^[4-7]。植被盖度也是指示区域生态环境变化的重要指标,监测植被盖度变化常常成为评价区域生态环境质量的重要手段^[8-9]。

以榆树为主要乔木树种的榆树疏林草原是位于温带森林和典型草原之间的一种地带性植被,是我国半干旱沙地的重要植物群落,其中以浑善达克沙地分布面积最广、数量最多、草原景观最为典型,是现今浑善达克沙地植被生态系统的顶级群落类型^[10-11]。浑善达克沙地位于京津地区的西北部。长期以来由于气候变化和人类活动的加剧,导致榆树疏林草原面积迅速减少^[12]、生态环境退化,引起区域浮沙和沙尘暴天气频繁的发生,成为引起京津地区风沙危害的主要沙尘源区之一^[13]。准确获取浑善达克沙地榆树疏林草原区域植被盖度是反映该区域植被生长状况的重要前提。因此,建立一套可重复、可比较、精确的植被盖度测量方法,不但能够及时准确地掌握该区域植被的季节性动态变化规律,而且有利于区域生态质量的监测和评估的,维护该区域脆弱生态系统的持续稳定发展^[14-16]。

目前,基于卫星的遥感测量是常见的大范围植被盖度估算方法^[17-18]。卫星遥感图像覆盖范围广、光谱信息丰富,可以实现大范围植被特征动态获取^[19-20]。然而,同一区域不同类型的植被冠层结构和物候期不同,卫星遥感估算植被盖度常常忽略了木本和草本植被的差异,不能揭示不同类型植被物候变化规律,卫星影像的分辨率也难以实现植被冠层的精确定量分析^[21-22]。基于地面的植被观测可以精确的获取个体植物的功能和结构属性,但是基于地面的植物定位观测数据受人力限制难以推广到大的区域^[23]。目前对榆树疏林草原的研究主要集中在样地尺度开展地面观测^[24-26],但是具有稀疏植被分布的榆树疏林草原景观异质性大,生长季内榆树疏林草原乔木、灌木和草本具有不同的生长发育节律,深入解析景观尺度上不同类型植被覆盖度的动态变化可以更准确的反映榆树疏林草原生态系统内不同植被的生长动态。无人机近地面遥感技术数据采集灵活、图像空间分辨率高,十分适合分析景观尺度榆树疏林草原生态系统不同植被类型覆盖度的动态变化。

无人机系统是一种以无人机为平台获取高时空分辨率影像数据的测量系统^[27-28],恰好填补了地面测量

与卫星遥感影像之间的尺度差异。利用无人机遥感影像获取的数字表面模型、数字高程模型和数字正射投影模型,可用于精确获取景观尺度的植被类型和结构特征。近几年随着机器学习算法在数字图像提取地物信息技术的发展^[29-30],利用高精度无人机图像监测植被动态、动物栖息地特征和评价生物多样性^[31-39]正成为生态和遥感领域的热点。但是,如何利用无人机构建一套可以快速、准确、自动获取景观尺度植被类型和估算植被覆盖度的自动化工具,并实现植被状况的动态分析,仍是当前生态学和林学研究面临的主要挑战。

在这项研究中,我们首先构建了一套基于无人机的植被监测平台,实现景观尺度高分辨率数字正射影像的生产;接下来利用决策树算法基于正射影像自动划分植被类型和估算植被覆盖度;最终,应用无人机和决策树算法实现生长季内榆树疏林草原木本和草本植被类型划分和覆盖度动态估计,明确木本和草本植被覆盖度对植被总覆盖度的贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究依托位于中国内蒙古自治区锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来附近的浑善达克沙地榆树疏林草原长期定位监测大样地(1 km×1 km, 42°57'56"N, 115°57'32"E, 平均海拔 1300 m), 该区域是浑善达克沙地榆树疏林典型分布区。研究区属中温带大陆性半干旱季风气候, 多年平均气温 2.1℃, 多年平均降雨量为 365 mm, 降水量季节分布不均, 主要集中在 7—9 月。样地土壤类型为风沙土, 榆树(*Ulmus pumila*)是样地唯一乔木种, 与之伴生的灌木层优势种为矮斗叶绣线菊(*Spiraea aquilegifolia*), 小红柳(*Salix microstachya* var. *bordensis*), 黄柳(*Salix gordejewii*), 柴桦(*Betula fruticosa*)等, 草本层则主要由多年生草本盐蒿(*Artemisia halodendron*)和一年生草本叉分蓼(*Polygonum divaricatum*), 羊草(*Leymus chinensis*)等近 190 种草本植被构成(图 1)。



图 1 中国内蒙古自治区浑善达克沙地榆树疏林草原长期原位监测大样地

Fig.1 Long-term Monitoring Plot in Elm (*Ulmus pumila*) Sparse Forest Grassland Ecosystem (ESFOGE-Plot) in the Otindag Sandy Land, Inner Mongolia, China

1.2 无人机监测平台和数据获取

2017 年生长季,利用四旋翼大疆无人机(悟 1pro, DJI Inc., 中国),机载传感器为禅思 X5(1600 万像素),获取了大样地 7 个时期的无人机影像。观测日期分别为 5 月 08 日,6 月 14 日,7 月 12 日,8 月 07 日,9 月 01 日,9 月 24 日和 10 月 24 日。

1.2.1 无人机影像采集

实地航拍前,首先根据大样地边界点地理坐标,计算航点位置规划飞行航线,如图2所示。无人机飞行高度为100 m,飞行路线旁向重叠70%,航向重叠75%。航拍一般在11:00—14:00进行,此时的天空条件较好,地面阴影最小。利用无人机航线飞行控制软件 Litchi for DJI Drones (Ver. 3.10.5, VC Technology Ltd. 美国)搭建地面控制台,完成无人机的飞行和数据采集工作。整块样地每次图像采集飞行时间为2.5—3小时,图像为1750—2050张(图2)。

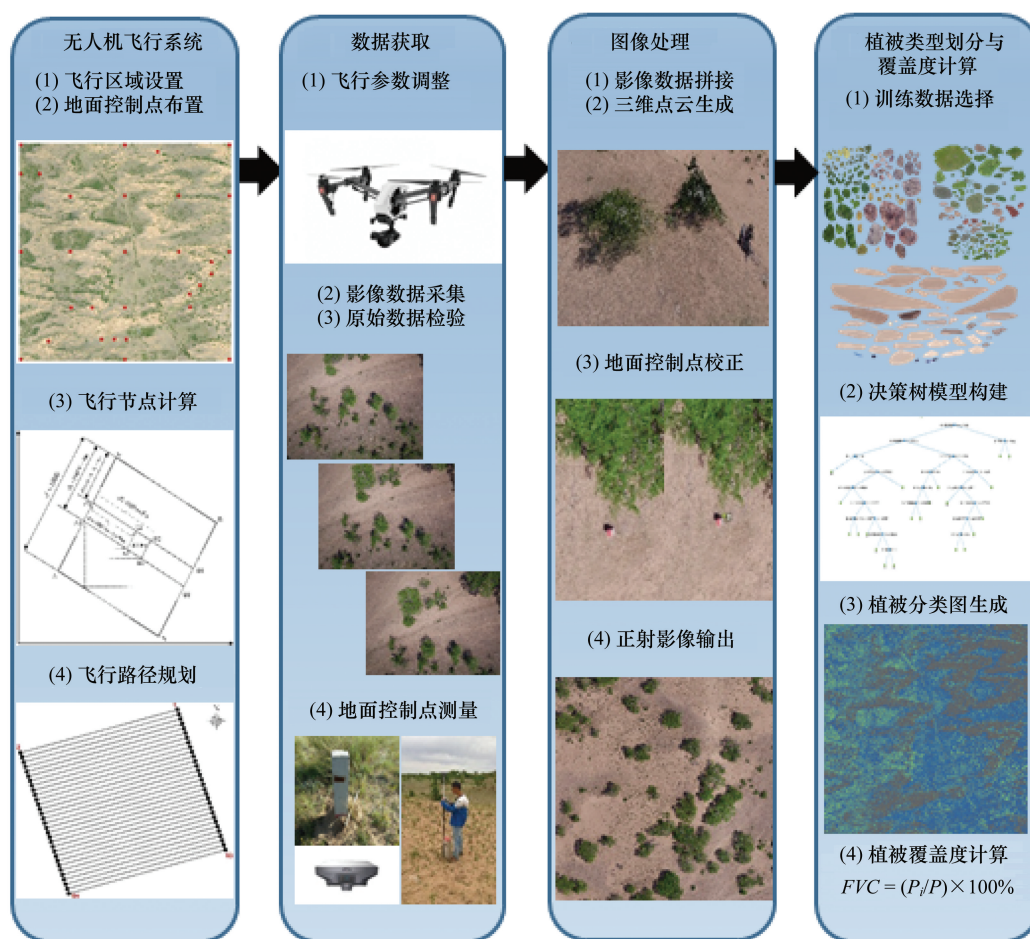


图2 基于无人机监测平台和机器学习算法分析木本、草本植被类型和覆盖度估算工作流程图

Fig.2 Flowchart of monitoring, classifying vegetation and calculating the fractional vegetation cover based on UAV

1.2.2 地面控制点测量

样地设置了22个顶部为红色的水泥桩作为永久地面控制点(GCP),用于无人机数据影像的精度校正,分布如图2所示。地面控制点的经度、纬度和高程使用RTK(海星达,iRTK2,中国,水平精度<3 cm,高程精度<5 cm)测量。

1.2.3 正射影像生产

首先将原始航拍图像进行几何校正,基于图像特征匹配算法(Structure from Motion, SfM)寻找相邻图像对间的同一特征点并进行特征点匹配,得到样地三维点云^[32,40-41]。在此过程中,利用地面控制点的精确坐标值对匹配的特征点进行地理位置校正。最终基于关键匹配特征点生成整个样地的正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM),如图2所示。以上过程使用PhotoScan Pro(V1.3.2, Agisoft, 俄罗斯)在高性能计算机上完成(ProLiant ML350e Gen8, CPU: E5-2420, RAM: 48.0G)。100公顷大样地的正射影像需要30到35小时的连续计算。无人机飞行高度为100 m时,获取的正射影像的空间分辨率为2.67 cm/像元。

1.3 植被类型划分和覆盖度估计

基于样地正射影像,采用决策树算法^[42]进行木本植被、草本植被和裸沙地的分类,利用分类后的图像计算植被和裸地的覆盖度。植被分类和计算方法如下:

(1)利用色彩空间拓展函数,将 DOM 各像元的 RGB 信息进行扩展,将色彩空间拓展到具有 RGB、HSV、 $L^*a^*b^*$ 和 XYZ 的彩色空间 12 种不同特征的颜色信息;(2)使用图像编辑软件(如 ImageJ, Photoshop 等)采集不同时期正射影像中的木本、草本和裸沙地像元,建立一套样地不同类型地物的样本训练数据(图 2d);(3)基于分类和回归决策树(Classification and regression tree, CART)算法,建立颜色特征与分类类别的二叉树分类模型,并进行模型剪枝优化,生成最优决策树分类模型;(4)应用生成的决策树模型对不同时期正射影像进行木本、草本和裸沙地像元分类;(5)基于分类后的植被图,利用公式(1)分别计算木本、草本植被覆盖度:

$$FVC = (P_i/P) \times 100\% \quad (1)$$

式中,FVC 为植被(木本、草本)覆盖度, P_i 为植被分类图中不同类型植被(i =木本/草本)像素的个数, P 为植被分类图中像素总数。

以上方法已被开发成在线交互式的“无人机高精度影像分析平台”(https://www.uav-hirap.org)^[43],覆盖度估算结果采用目视解译和机器分类相对比的方法进行了验证和评估,总体精度为 0.77,Kappa 系数为 0.64。

1.4 榆树疏林草原植被生长季动态

采用上述方法计算榆树疏林草原大样地生长季不同时期内木本和草本植被的覆盖度,评估样地生长季内木本和草本植被动态,明确木本和草本植被对植被总覆盖度的贡献。本研究中所计算的植被覆盖度包含了植被绿色部分(叶片)和植被非绿色部分(乔木、灌木的枝干和未变绿的多年生草本等)。

2 结果与分析

2.1 木本和草本植被类型划分及生长季变化

生长季不同阶段获取的正射影像能够较好的反映出绿色植被的生长动态,分类后的植被类型分布图清晰的反映出木本和草本植被在生长季内的动态变化(图 3)。由图 3 可见,木本植被主要集中分布在大样地的左侧区域,右侧较少。生长季初期的正射影像(图 3A)几乎没有绿色植被,实地观测到木本植被尚未出现叶片,草本植被为刚返青的草本和多年生草本的枯落体(图 3a)。6 月的正射影像(图 3B)中出现明显的绿色植被,木本植被开始长出叶片(图 3b)。7 月和 8 月的正射影像(图 3C 和图 3D)显示这个阶段是整个生长季绿色植被覆盖最高时期,植物类型分布图中(图 3c 和图 3d)木本植被的覆盖面积最大,草本植被分布也最广。9 月的正射影像(图 3E)显示植被进入到衰落阶段,图中绿色植被范围变小,此时的植物类型分布图(图 3e)显示草本植被的分布面积开始减少,其中样地右侧尤其明显。至 9 月末,样地绿色植被已全部枯黄(图 3F)。生长季末期(图 3G)中植被已无绿色叶片,植物类型分布图(图 3g)中的木本植被和草本植被多为乔灌木的枝干和草本的枯落物。

2.2 植被覆盖度生长季动态

生长季不同时期木本植被和草本植被覆盖度动态如图 4 所示呈单峰分布,木本植被覆盖度最低值为 17%,最高值为 22%,整个生长季变化不大,均值为 $(19 \pm 2)\%$;相对木本植被,草本植被覆盖度在生长季内变化较大,最低值为 37%,最高值为 61%,整个生长季均值为 $(50 \pm 8)\%$ 。木本与草本植被覆盖度最高值均出现在生长期中期,但木本植被覆盖度最低值出现在生长季初,草本植被覆盖度最高值出现在生长季末。植物总覆盖度受木本植被与草本植被共同影响,最低值为 55%,最高值为 83%,其分别出现在生长季末和生长季中,整个生长季均值为 $(69 \pm 9)\%$ 。

由图 4 可见,植被盖度增加最快的阶段为 6 月到 7 月,草本植被盖度变化速率要高于木本植被,原因可能是草本没有枝干其盖度变化主要受叶片影响。进入衰落期的木本和草本植被盖度变化速率都要高于生长期。

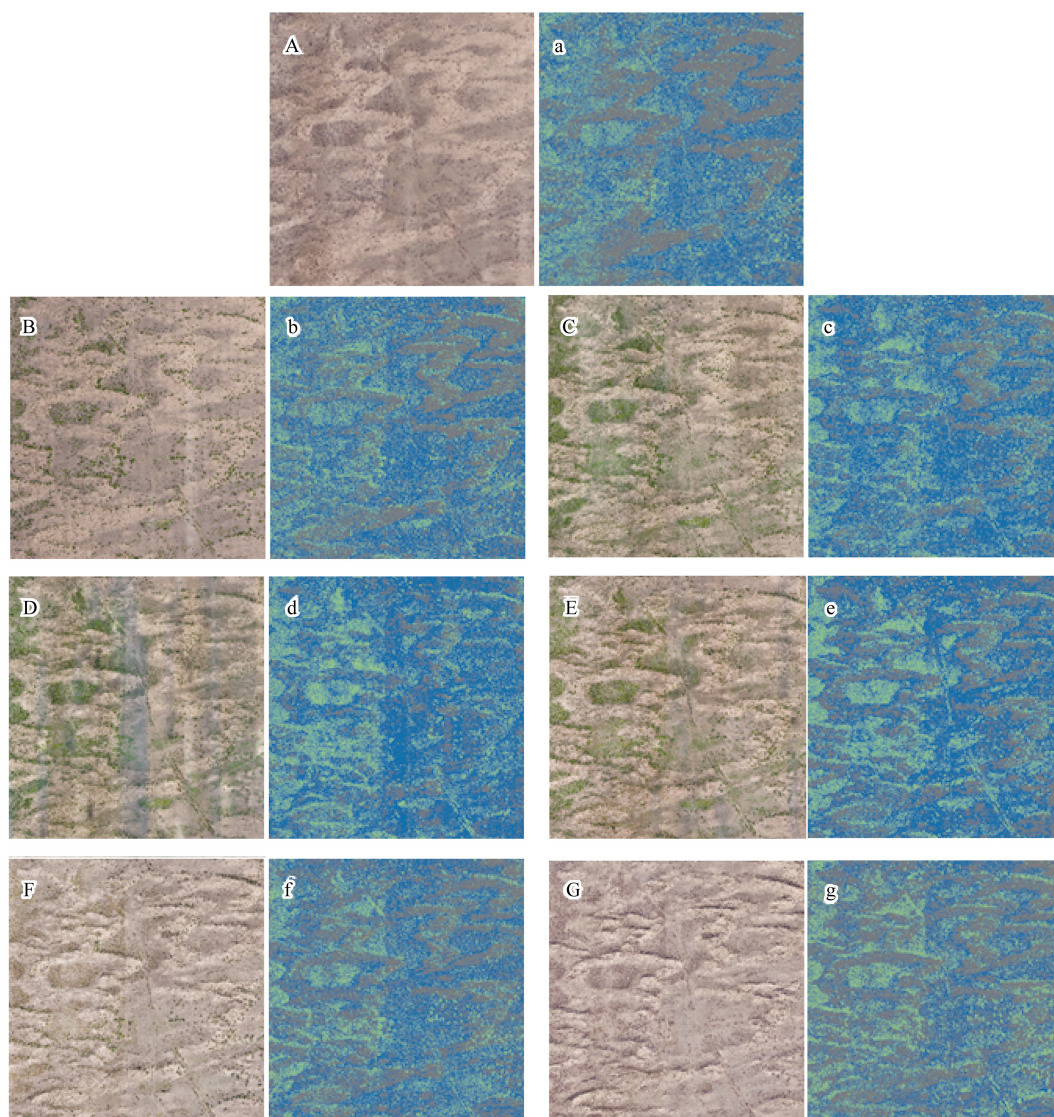


图3 浑善达克沙地榆树疏林草原长期定位监测大样地 2017 年生长季不同时期正射数影像(分辨率:2.67 cm/像元)和植被分类结果

Fig.3 Time series of DOM images and classified images of ESFOGE-Plot in Otindag sandyland during the growing season in 2017

影像采集日期:A:5月08日, B:6月14日, C:7月12日, D:8月07日, E:9月01日, F:9月24日, G:10月24日)。分类后的植被类型图 a—g(绿色代表木本植被, 蓝色代表草本植被, 灰色代表非植被类型)

2.3 木本和草本植被对植被总覆盖度的贡献

计算生长季 7 个时期草本植被和木本植被对植被总盖度的贡献率, 由图 5 可见, 草本植被对植被总覆盖度贡献最低为 67%, 均值为 73%; 木本植被对植被总覆盖度贡献最高为 33%, 均值为 27%。在生长季初期和中期, 草本植被贡献率为 72%—76%, 木本植被贡献率为 24%—28%, 两者对植被总盖度的贡献保持稳定。生长季末期, 由于草本植被完全枯萎, 木本植被对植被总覆盖度的贡献上升到 1/3。相对于较为稳定的木本植被, 草本植被覆盖度受外界环境影响较大, 整个生长季草本植被对植被总盖度的贡献远大于木本植被, 因此榆树疏林草原植被的盖度主要受草本植被的盖度影响。

3 讨论和结论

无人机遥感影像数据获取时间灵活、图像空间分辨率高(<10 cm 分辨率), 相比于有人机和高空间分辨率的卫星影像, 无人机遥感降低了数据获取成本, 避免了云层对图像的影响, 甚至可以在阴天条件下进行影像数据采集^[22], 也成为用于校准卫星遥感观测的理想工具^[44]。无人机系统在生态学应用研究弥补了现有样地尺

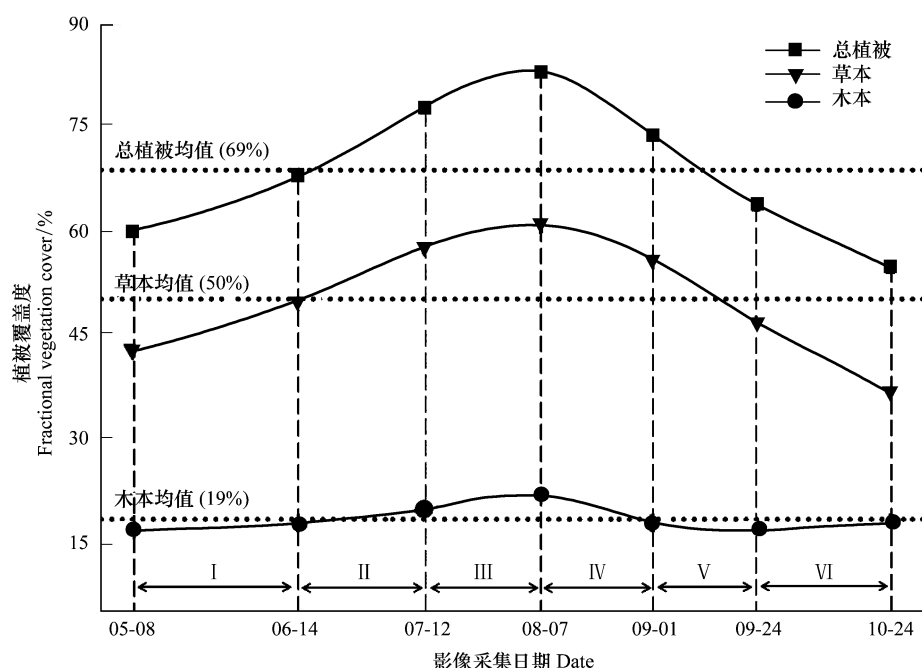


图4 浑善达克沙地榆树疏林草原长期定位监测大样地 2017 年生长季木本植被、草本植被和植被总植被覆盖度动态

Fig.4 Dynamics of fractional vegetation cover for woody plants, herbaceous plants and vegetation in the ESFOGE-Plot in Otindag sandyland during the growing season in 2017

度地面调查与区域尺度卫星遥感的尺度差距,实现了景观尺度的高分辨率植被观测^[45]。本研究构建的无人机植被平台飞行时间灵活、运行成本低,十分适合用于环境频繁变化的多次植被影像数据采集^[46]。

研究人员应用卫星遥感对浑善达克沙地的植被覆盖度变化趋势进行了研究^[47-49],但是利用卫星影像只能评估区域整体植被覆盖度。本研究利用高空间分辨率的无人机遥感影像,实现了木本和草本两种植被类型生长动态评估,结果表明榆树疏林生态系统中木本植被覆盖度在整个生长季变化较小,对植被总覆盖度的平均贡献率低于 30%;而草本植被覆盖度在生长季内变化幅度更大,植被总覆盖度的变化主要受草本植被覆盖度的影响。由于干旱区植被分布稀疏,相比卫星影像,无人机植被监测平台获取的高空间分辨率影像更易于在干旱区提取植被结构信息和监测生境质量^[29]。

本研究构建的无人机植被监测平台主要包括飞行方案规划、原始影像获取、基础数据产品生产和图像自动分析。研究首次获取了浑善达克沙地榆树疏林草原生态系统木本植被和草本植被覆盖度的生长季动态,结果表明该生态系统植被总覆盖度的变化主要受草本植被的影响。对榆树疏林草原生态系统植被生长季动态观测证明,无人机植被监测平台是一种高效、准确的植被监测工具,未来也可应用于其他各种类型生态系统植被的监测和评估。

致谢:无人机航线规划和野外飞行得到首都师范大学 2018 届硕士吴隐的指导和帮助,特此致谢。

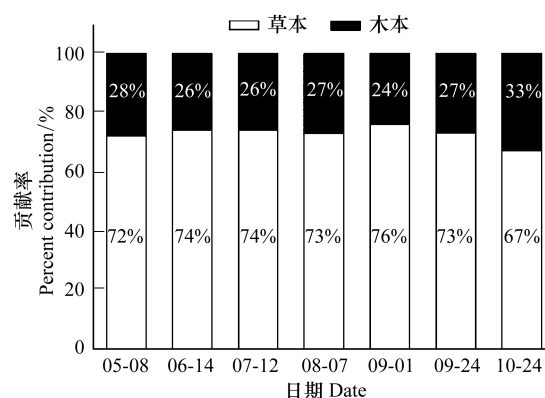


图5 2017 年浑善达克沙地榆树疏林草原长期定位监测大样地生长季不同时间木本植被和草本植被对总植被覆盖度的贡献

Fig.5 Contribution of woody plants and herbaceous plants to the FVC of the ESFOGE-Plot during different observation date in 2017

参考文献 (References):

- [1] DeFries R, Achard F, Brown S, Herold M, Murdiyarso D, Schlamadinger B, De Souza C Jr. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(4): 385-394.
- [2] Yang J, Weisberg P J, Bristow N A. Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 62-71.
- [3] Harris A, Carr A S, Dash J. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28: 131-139.
- [4] 刘树华, 黄子琛, 刘立超. 土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模拟. *地理学报*, 1996, 51(2): 118-126.
- [5] 郭忠升. 水土保持植被建设中的三个盖度: 潜势盖度、临界盖度和有效盖度. *中国水土保持*, 2000, (4): 30-31.
- [6] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究. *地理学报*, 2001, 56(3): 261-268.
- [7] 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 250-257.
- [8] 秦伟, 朱清科, 张学霞, 李文华, 方斌. 植被覆盖度及其测算方法研究进展. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(9): 163-170.
- [9] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [10] 唐毅, 蒋德明, 陈雪峰, 押田敏雄. 疏林草原榆树天然更新研究进展. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1226-1230.
- [11] Liu L, Wang H, Lin C C, Wang D L. Vegetation and community changes of elm (*Ulmus pumila*) woodlands in Northeastern China in 1983-2011. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(3): 321-330.
- [12] 杨霞, 李钢铁, 王永胜, 邹受益. 浑善达克沙地桑根达来古榆树调查研究. *内蒙古农业大学学报*, 2011, 32(4): 172-178.
- [13] 京津风沙源治理工程二期规划思路研究项目组. 京津风沙源治理工程二期规划思路研究. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [14] Elmendorf S C, Henry G H R, Hollister R D, Björk R G, Björkman A D, Callaghan T V, Collier L S, Cooper E J, Cornelissen J H C, Day T A, Fosaa A M, Gould W A, Grétarsdóttir J, Harte J, Hermanutz L, Hik D S, Hofgaard A, Jarrad F, Jónsdóttir I S, Keuper F, Klanderud K, Klein J A, Koh S, Kudo G, Lang S I, Loewen V, May J L, Mercado J, Michelsen A, Molau U, Myers-Smith I H, Oberbauer S F, Pieper S, Post E, Rixen C, Robinson C H, Schmidt N M, Shaver G R, Stenström A, Tolvanen A, Totland Ø, Troxler T, Wahren C H, Webber P J, Welker J M, Wookey P A. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 2012, 15(2): 164-175.
- [15] Brazier R E, Turnbull L, Wainwright J, Bol R. Carbon loss by water erosion in drylands: implications from a study of vegetation change in the south-west USA. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2212-2222.
- [16] 宋清洁, 崔霞, 张瑶瑶, 孟宝平, 高金龙, 向宇轩. 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. *草业科学*, 2017, 34(1): 40-50.
- [17] Choi H I. Parameterization of high resolution vegetation characteristics using remote sensing products for the Nakdong River watershed, Korea. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 473-490.
- [18] Li F, Chen W, Zeng Y, Zhao Q J, Wu B F. Improving estimates of grassland fractional vegetation cover based on a pixel dichotomy model: a case study in Inner Mongolia, China. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4705-4722.
- [19] Jia K, Wu B F, Tian Y C, Zeng Y, Li Q Z. Vegetation classification method with biochemical composition estimated from remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(24): 9307-9325.
- [20] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 高帅, 江波, 赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [21] Getzin S, Wiegand K, Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(2): 397-404.
- [22] Malenovsky Z, Lucieer A, King D H, Turnbull J D, Robinson S A. Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(12): 1842-1857.
- [23] Olsoy P J, Shipley L A, Rachlow J L, Forbey J S, Glenn N F, Burgess M A, Thornton D H. Unmanned aerial systems measure structural habitat features for wildlife across multiple scales. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, 9(3): 594-604.
- [24] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40-49.
- [25] 李钢铁, 王永胜, 余新晓, 李清雪, 岳永杰. 浑善达克沙地不同密度榆树种群空间格局. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 141-145.
- [26] 刘振, 董智, 李红丽, 李钢铁. 浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局. *生态学报*, 2013, 33(1): 294-301.
- [27] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2014, 39(5): 505-513, 540-540.
- [28] Xiang H T, Tian L. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV).

- Biosystems Engineering, 2011, 108(2): 174-190.
- [29] Guo W, Rage U K, Ninomiya S. Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 96: 58-66.
- [30] Mu Y, Wang F, Zheng B Y, Guo W, Feng Y M. McGET: a rapid image-based method to determine the morphological characteristics of gravels on the Gobi desert surface. *Geomorphology*, 2018, 304: 89-98.
- [31] Faye E, Rebaudo F, Yáñez-Cajó D, Cauvy-Fraunié S, Dangles O. A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: from unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(4): 437-446.
- [32] Cunliffe A M, Brazier R E, Anderson K. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 129-143.
- [33] Dandois J, Baker M, Olano M, Parker G G, Ellis E C. What is the point? Evaluating the structure, color, and semantic traits of computer vision point clouds of vegetation. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 355.
- [34] Husson E, Reese H, Ecke F. Combining spectral data and a DSM from UAS-images for improved classification of non-submerged aquatic vegetation. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 247.
- [35] 胡建波, 张健. 无人机遥感在生态学中的应用进展. *生态学报*, 2018, 38(1): 20-30.
- [36] Dandois J P, Ellis E C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 259-276.
- [37] Zahawi R A, Dandois J P, Holl K D, Nadwodny D, Reid J L, Ellis E C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*, 2015, 186: 287-295.
- [38] 高林, 杨贵军, 李红军, 李振海, 冯海宽, 王磊, 董锦绘, 贺鹏. 基于无人机数码影像的冬小麦叶面积指数探测研究. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1254-1264.
- [39] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 刘忠军. 基于 UAV 低空遥感的荒漠林大沙鼠洞群覆盖率及分布特征研究——以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. *生态学报*, 2018, 38(3): 953-963.
- [40] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 80(2): 189-210.
- [41] Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, Hambrey M J, Reynolds J M. 'Structure-from-motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012, 179: 300-314.
- [42] Breiman L, Friedman J, Stone C J, Olshen R A. *Classification and Regression Trees*. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 1984.
- [43] Wang H Z, Wang F, Yao X L, Mu Y, Bai Y F, Lu Q. UAV-HiRAP: a novel method to improve landscape-level vegetation classification and coverage fraction estimation with unmanned aerial vehicle platform. The 12th International Congress of Ecological (INTECOL). Beijing, China, August 21-25, 2017.
- [44] Bian J H, Li A N, Zhang Z J, Zhao W, Lei G B, Yin G F, Jin H A, Tan J B, Huang C Q. Monitoring fractional green vegetation cover dynamics over a seasonally inundated alpine wetland using dense time series HJ-1A/B constellation images and an adaptive endmember selection LSMM model. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 197: 98-114.
- [45] Christie K S, Gilbert S L, Brown C L, Hatfield M, Hanson L. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(5): 242-251.
- [46] Messinger M, Asner G P, Silman M. Rapid assessments of amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 615.
- [47] 元志辉, 包刚, 银山, 雷军, 包玉海, 萨楚拉. 2000-2014 年浑善达克沙地植被覆盖变化研究. *草业学报*, 2016, 25(1): 33-46.
- [48] 朱芳莹, 鹿化煜, 弋双文, 王晓勇. 基于 NDVI 指数的浑善达克沙地植被时空变化规律分析. *中国水土保持*, 2017, (3): 31-34.
- [49] 王光镇, 王静璞, 邹学勇, 王周龙, 宗敏. 基于像元三分模型的锡林郭勒草原光合植被和非光合植被覆盖度估算. *生态学报*, 2017, 37(17): 5722-5731.