•研究报告•

基于近低空遥感技术的国家公园功能分区边界识别：以钱江源国家公园体制试点区为例

李 杰¹ 李巍岳^{1*} 付 晶¹ 高 峻¹ 杨 蕾² 何苇航¹¹ (上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234)² (上海师范大学生命科学学院, 上海 200234)

摘要: 边界划分是国家公园保护与管理的重要手段, 通常以行政区和自然地理边界为参考, 借助人工干预的方法进行划分, 而较少考虑当地生态系统的完整性以及人为干扰因素, 造成边界划分不合理、不清晰。本研究以钱江源国家公园体制试点区中横岭角和古田山访客中心2处干扰较大的典型区为例, 用无人机近低空遥感技术结合实地植被调查, 评估现有功能分区。结果表明, 横岭角和古田山访客中心功能分区修正面积分别为53,550 m²和19,667 m², 分别占航拍研究区域面积的29.75%和16.39%。功能分区不合理划分的原因包括: (1)人为干扰较大的区域与自然地物较难分辨; (2)部分边界划分没有考虑生态系统的完整性, 将面积较小或完整性稍差的天然林划分为保护级别较低的区域。本研究采用航拍影像结合地面调查, 从保护当地生态系统完整性和减小人为干扰因素的角度出发, 为国家公园功能分区边界划分与细化提供一种合理可行的方法。

关键词: 近低空遥感; 地面调查; 国家公园; 功能分区; 人为干扰; 边界识别

Using low-altitude UAV remote sensing to identify national park functional zoning boundary: A case study in Qianjiangyuan National Park pilot

Jie Li¹, Weiye Li^{1*}, Jing Fu¹, Jun Gao¹, Lei Yang², Weihang He¹¹ School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234² College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234

Abstract: Delineating areas within a national park for different uses and management plans is important for protecting the land. Functional zones may be designated based on administrative boundaries, natural geographical boundaries, or a manual survey. However, the current delineation practice barely considers the integrity of the local ecosystem or human factors, which results in unreasonable and unclear boundaries. Considering two typical areas with large human interference in Qianjiangyuan National Park pilot as an example, we employed both low-altitude unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology and on-the-ground field vegetation surveys to evaluate the legitimacy of the already established functional zoning boundaries. The results show that 53,550 m² and 19,667 m² of the functional area surrounding Henglingjiao and Gutianshan Visitor Center had been modified, respectively, accounting for 29.75% and 16.39% of the aerial study area. Misclassification of functional zoning may occur due to (1) difficulties in distinguishing between areas with large human disturbances and natural features; and (2) partitioning the natural forests into small sections that do not consider the integrity of the vegetative system, which results in lower levels of protection. This study uses a combination of aerial imagery and ground surveys to provide a reasonable and feasible method for the future identification and refinement of functional boundaries in national parks so as to best protect local ecosystem integrity and to reduce human disturbance factors.

Key words: low-altitude UAV remote sensing; on-the-ground field survey; national park; functional zoning; human interference; boundary identification

收稿日期: 2018-09-17; 接受日期: 2019-01-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0506404)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lwy326@shnu.edu.cn

中国共产党的十九大报告提出“构建国土空间开发保护制度,完善主体功能区配套政策,建立以国家公园为主体的自然保护地体系”,预示我国将逐步从以自然保护区为主转向以国家公园为主体开展自然保护事业(唐小平和栾晓峰,2017)。国家公园是在保护生态系统完整性的前提下,为保护具有国家代表性的自然景观、野生生物、特殊生态系统,强化自然资源有效保护与合理利用建立的自然区域(唐小平,2014;虞虎等,2017)。功能分区是国家公园总体规划的核心内容,规定了国家公园保护和利用的具体空间和管控要求,是当前国家公园建设面临的重要课题(付梦娣等,2017)。

目前很多发达国家和地区的国家公园围绕自然生态保护和人类游憩利用等方面,都建立了较为成熟的功能分区标准,如美国根据开发强度以及游憩利用需求将国家公园主要划分为4个区:原始自然保护区、特殊自然保护区、自然环境区和特别利用区(严国泰和沈豪,2015);加拿大主要根据生态完整性、公众的游憩需求将国家公园划分为特别保护区、荒野区、自然环境区、户外游憩区和公园服务区;日本主要根据公园景观等级、生态系统完整性、人类活动影响以及游客需求等将国家公园划分为特别保护区、特别区I类、特别区II类、特别区III类、普通区等(黄丽玲等,2007)。我国国家公园体制试点区功能分区的研究还处在探索阶段,目前的分区方法多以统计学手段为主,从人为划分发展到基于计算机辅助决策,配合遥感技术、地理信息系统、全球定位系统技术与人工智能等手段,对影响分区的各因子进行筛选与确权,得到分区结果(呼延佼奇等,2014;梁健超等,2017)。例如,付梦娣等(2017)运用层次分析法和专家打分法,将三江源国家公园黄河源园区划分为核心保育区、生态保育修复区、传统利用区、居住和游憩服务区4个功能区。虞虎等(2017)结合钱江源地区全国土地调查矢量数据和生态资源调查成果,对资源要素重叠情况进行归并,将钱江源国家公园划分为核心保护区、生态保育区、游憩展示区和传统利用区4个功能分区。吴承照等(2017)在云南省大山包国家公园通过对黑颈鹤(*Grus nigricollis*)生活行为空间的分析,提出荒野保护区、生态保育区、传统利用区、风景展示区、综合服务区的分区模式及其边界划定与监控方法。科学

合理地划定国家公园边界,有助于将具有重要价值的区域纳入自然保护区范围,有效保护生态系统和濒危物种,平衡资源保护和社区发展的关系(杨锐和曹越,2017)。目前关于功能分区的研究中,通常会以国家公园内部行政区边界、山地河流等自然地理边界作为标识进行划分,使用的数据缺乏高水平分辨率和较新的遥测影像,导致在方法中对当地生态系统的完整性和人为干扰的判断有误差,因而出现了边界划分不清晰、分区不合理的问题(Zhang et al, 2017)。

自然保护区边界划分的手段主要包括地面调查和遥感技术。传统的地面调查需要投入大量的人力、物力和时间,主要用于生物多样性监测,通常是在尺度较小的样地水平。遥感技术平台按观测高度可分为卫星遥感、航空遥感和近低空遥感。卫星遥感可进行大尺度、长序列的环境监测,已广泛应用于从群落到区域的各级空间尺度上的植被物种分类,但图像空间分辨率不够精细,自然保护区植被覆盖具有较大的异质性,难以精确区分,主要用于洲际-全球尺度的研究。航空遥感一般集成多传感器,可获得多类型的遥感数据,主要在景观-区域尺度有较大的优势(郭庆华等,2018)。无人机近低空遥感是卫星遥感和航空遥感的有力补充,可获取厘米级分辨率的影像,具有数据采集方便灵活、运行成本低、图像空间分辨率高、高程精细等优点,主要应用于样地-景观尺度的研究,研究区域一般位于城市以外的森林、草地、湿地等人为活动较难到达的自然区域,在调查植被资源、监测自然环境、保护生物多样性等领域有广泛的应用(郭庆华等,2016; Lu & He, 2017; 吴永亮等, 2017)。如Puliti等(2017)在挪威南部Gran市将ALS航空影像数据与无人机近低空航摄数据结合,进行大规模森林资源调查。Tian等(2017)在广西丹兜海红树林区利用无人机航拍图像对背景复杂和多物种的红树林进行叶面积指数图绘制,并与WorldView-2影像比较。

本文以钱江源国家公园体制试点区(以下简称钱江源国家公园)为例,以现有功能分区为评判依据,通过划分干扰区获取典型区域,利用无人机遥感技术结合实地调查等方法识别现有功能分区中存在的主要问题,进而探索近低空遥感技术在国家公园分区中的优势,为国家公园功能分区边界划分与细化提供一种可行的方法。

1 研究区概况

钱江源国家公园于2016年6月成立,位于浙江省衢州市开化县境内东北部,西与江西婺源县、德兴市毗邻,北接安徽省休宁县,东西介于118.03°–118.31° E之间,南北介于29.21°–29.44° N之间。总面积约252.38 km²,包含苏庄、长虹、何田、齐溪4个乡镇19个行政村72个自然村,共计人口9,744人(截至2015年)。研究区中分布有中国特有的珍稀濒危物种、国家一级保护动物白颈长尾雉(*Syrmaticus ellioti*)、黑麂(*Muntiacus crinifrons*)。空间范围包括古田山国家级自然保护区(81.07 km²)、钱江源国家森林公园(45 km²)以及连接两地的生态廊道。钱江源国家公园为亚热带季风性湿润气候,最高海拔低于1,200 m,植被属于中亚热带低海拔常绿阔叶林,沿海拔梯度依次分布有中亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针阔叶混交林、针叶林、亚高山湿地5种植被类型。植物区系成分以华东植物区系为主,兼具过渡带特征。

根据《钱江源国家公园体制试点区总体规划(2016–2025)》,钱江源国家公园共有4个功能区:核心保护区、生态保育区、游憩展示区和传统利用区。核心保护区面积为72.33 km²,占28.66%,范围包括古田山国家级自然保护区核心区和缓冲区、钱江源国家森林公园的重要区域,主要保护钱江源流域及长江水系、动植物资源和生态环境。生态保育区面积为135.80 km²,占53.81%,范围包括古田山国家级自然保护区实验区的大部分、钱江源国家森林公园部分以及连接两处保护地的齐溪、何田、长虹、苏庄等的部分林地,以强化保护和自然恢复为主,开展科学研究和公众环境教育活动。游憩展示区面积为8.12 km²,占3.22%,范围包括古田山、齐溪、长虹、何田的主要景点和部分居民点集中的区域,在不影响当地居民生产生活的前提下,开展低容量的生态游憩活动。传统利用区面积为36.13 km²,占14.31%,范围包括长虹、何田东部区域,在保护资源和生态的前提下,引导社区进行基础设施建设、林业生产等生产经营活动。

2 研究方法

2.1 功能分区典型区筛选

以钱江源国家公园的现有功能分区为基础,综

合植被数据、坡度、人口和道路等因素,得到干扰区域分布范围,筛选出处于功能分区边界的干扰区作为功能分区典型区(张林艳等, 2006)。根据无人机正射影像结合地面调查得到的植被、地形地貌等信息,确定实际的功能分区边界。两种手段共同应用于功能分区典型区的现状分析、边界识别,从而对功能分区的重点区域提出优化调整方案。整合功能分区设计和典型区优化调整方案,完成国家公园试点区功能分区边界识别(图1)。

植被数据选择2017年MODIS植被覆盖指数年分布产品,地形数据选择2010年30 m分辨率的ASTER GDEM数据,二者来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);乡镇、村的位置和道路数据来源于开源地图数据OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>)。

干扰区各类因子的赋值原则是植被生长指数越大,植被生长情况越好,人为干扰越小,赋值越低;坡度越大,可达性越低,人为干扰程度越低,

图1 研究总体思路

Fig. 1 Flowchart of study

赋值越低; 乡镇、村的位置距离越近, 干扰越大, 赋值越高; 道路距离越近, 干扰越大, 赋值越高; 综合实地考察、文献资料和专家意见, 将植被生长指数、坡度、人为干扰、道路干扰这4个栅格数据分别按照0.5、0.3、0.1、0.1的权重赋值。

2.2 功能分区典型区地面和无人机数据

参考钱江源国家公园的历史资料, 结合Google Earth影像以及当地的海拔、地势地貌、坡度与坡向情况, 在4个分区的边界处及功能分区典型区进行植被调查, 记录乔木层树种及胸径、树高、冠幅、盖度、郁闭度; 灌木层和草本层植物种类以及覆盖度等。

2017年12月8–10日, 天气晴朗、风力较小, 对功能分区典型区进行航空影像采集。航拍前, 针对拟拍摄的航拍影像区域进行控制点量测, 以保证每幅影像中的控制点数至少为6个且分布均匀, 控制点高程误差小于2 mm。选用大疆MAVIC PRO款多旋翼小型机, 相对航高120 m, 最大飞行速度为18 m/s, 搭载大疆FC220相机, 相机的有效像素为1,235万, 相机焦距为5 mm, 航拍影像最大分辨率为4,000 × 3,000像素。后期图像处理中, 采用ERDAS2013中的Leica Photogrammetry Suit (LPS)模块对数据进行空三加密处理, 依次对航拍影像进行相对定向与绝对定向, 通过影像与影像之间的同名点匹配, 结合实地采集的控制点对影像进行正射纠正。纠正后的坐标与控制点坐标(WGS84)相同; 由随机选择的同名点组成的散点插值生成研究区数字高程模型(DEM), 最终得到覆盖研究区1:200的正射影像图。正射影像具有绝对坐标, 采用地理信息中的空间分析功能, 可以得到研究区任意多边形的面积。

3 结果

3.1 功能分区典型区筛选

潜在干扰较大的区域主要分布在河流、道路等的周边, 呈现较为明显的连续条块状, 主要有北部的齐溪镇齐溪水库, 中部的田畝村何田溪, 库坑村–霞川村沿线的碧家河水库和长虹溪, 南部余村–溪西村沿线的余村溪; 分布在道路周边的区域有北部齐溪镇G205国道和通往钱江源森林公园的县级道路、南部苏庄镇到唐头村的村级道路沿线。此外, 中部和南部的零星地区受人为活动的影响, 存在不连

续的干扰区。

按照处于多个功能分区边界和存在较大干扰两个原则在钱江源国家公园内进行筛选, 排除道路和河流两大明显的边界划定影响因子, 中部的库坑村横岭角和南部的古田山访客中心均存在不连续的干扰区, 具有较强的代表性, 作为功能分区典型区, 需要通过地面调查和无人机航拍进一步分析(图2)。

库坑村位于钱江源国家公园中部的长虹乡, 山林中包括用材林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)、油茶(*Camellia oleifera*)等; 耕地中包括水田和旱地。下辖的自然村横岭角属于规模较小的居民点类型, 共计11户42人, 居住与生产较稳定, 对试点区资源有一定的依赖性, 有面积相对集中连片的农用地, 当地居民可能会对国家公园产生较大影响。库坑村横岭角航拍时间为2017年12月10日, 包含游憩展示区、生态保育区、传统利用区, 航拍区域总面积0.18 km²。

古田山访客中心位于钱江源国家公园南部, 古田山自然保护区入口处, 周边建有古田山庄宾馆及人工绿化、运动场等配套设施, 是国家公园访客到达较多的区域, 访客可能对国家公园产生较大影响。古田山访客中心航拍时间为2017年12月8日, 包含核心保护区、游憩展示区、生态保育区, 航拍区域总面积0.12 km²。

3.2 功能分区典型区地面调查结果

钱江源国家公园植被保存相对较好, 天然植被类型主要有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林等。人工林主要以毛竹、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和油茶为主。此外, 生态保育区与传统利用区边界处受人为干扰较大, 社区分散独立, 居民砍伐林木, 部分生态保育区边界处人为种植苗木和经济作物, 造成景观破坏和水土流失。

库坑村横岭角周边以人工经济林为主, 主要分布在海拔450–800 m的山坡, 以油茶林、毛竹林、杉木林和马尾松(*Pinus massoniana*)林为主, 少量区域散生木荷(*Schima superba*)和甜槠(*Castanopsis eyrei*), 人工梯田种植农作物油菜(*Brassica napus*)。

古田山访客中心周边植被有天然林和人工林, 天然林以常绿阔叶林、针阔混交林为主, 常绿阔叶林主要分布在海拔450–800 m的山坡和山麓, 根据优势种的不同, 又分为木荷 + 青冈林和木荷 + 甜

图2 钱江源国家公园干扰区分布图

Fig. 2 Interference distribution map of Qianjiangyuan National Park Pilot

楮林两种植被类型: (1)木荷 + 青冈林。主要分布在海拔600–800 m的山坡中部, 其树高12–17 m之间, 平均胸径20 cm左右。常伴有马醉木(*Pieris japonica*)、马尾松、盐肤木(*Rhus chinensis*)、化香(*Platycarya strobilacea*)等, 群落总郁闭度为0.9。灌木层高度在0.5–5 m之间, 主要种类有鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)、马银花(*R. ovatum*)、浙江红山茶(*Camellia chekiangoleosa*)等。草本层高在0.6 m以下, 以狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、苔草属(*Carex* sp.)植物为主。(2)木荷 + 甜楮林。其树高在8–14 m之间, 平均胸径在20 cm左右。伴有马尾松、山合欢(*Albizia kalkora*)、锥栗(*Castanea henryi*)等, 群落总郁闭度为0.85。灌木层高度在0.5–6 m之间, 主要种类有马银花、山胡椒(*Lindera glauca*)等。草本层高在0.6 m以下, 以箬竹(*Indocalamus tessellatus*)占优势。藤本种类常见羊角藤(*Morinda umbellata* subsp. *obovata*)、香花鸡血藤(*Callerya*

dielsiana)等。人工林主要分布在海拔650 m以下的山坡下部, 主要以毛竹林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林为主。

3.3 功能分区典型区航拍结果

库坑村横岭角功能分区涉及游憩展示区、传统利用区和生态保育区(图3a), 功能分区实际面积为0.18 km², 分区轮廓与地物分布基本一致, 村庄和人工梯田属于游憩展示区, 东、西两侧人工经济林分别属于传统利用区和生态保育区(图3b)。西侧由人工梯田包围的人工经济林长势良好, 功能分区设计图将其划分为游憩展示区, 中部高差较大的人工梯田种植有油菜, 功能分区设计图将其划分为生态保育区(图3c)。

古田山访客中心功能分区涉及游憩展示区、生态保育区和核心保护区(图4a), 功能分区实际面积为0.12 km², 分区轮廓基本沿地物分布, 人工设施及周边属于游憩展示区, 南、北两侧天然林分别属

图3 库坑村横岭角航拍分析图
Fig. 3 Aerial image and analysis of Henglingjiao in Kukeng Village

图4 古田山访客中心航拍分析图
Fig. 4 Aerial image and analysis of Gutianshan Visitor Center

于生态保育区和核心保护区(图4b)。对比地物和功能分区边界,北侧天然林中段与古田山庄相接部分是以毛竹林为主的人工经济林,功能分区设计图将其划分为游憩展示区,南侧人工设施以南的部分为长势良好的天然林,功能分区设计图将其划分为游憩展示区(图4c)。

3.4 功能分区典型区边界修正结果

按照库坑村横岭角周边人工林林缘线、梯田及其他人工地物的边界,划定较为精确的游憩展示区、生态保育区和传统利用区3个分区界线(图3d)。修正后的功能分区中,河流和村道串联的村庄建筑和西侧种植油菜的人工梯田受人为影响较大,属于游憩展示区,东侧以杉木、油茶和毛竹为主的经济林受到一定的人为影响,属于传统利用区,西侧梯田以外的人工经济林受人为影响较小,散生有木荷和甜槠,组成生态保育区(图3e)。修正功能分区边界时以实际用地情况为依据,参考植被情况,更符合钱江源国家公园用地现状。本研究修正总面积53,550 m²(图3f),修正前游憩展示区、生态保育区、传统利用区的面积分别为97,322 m²、57,711 m²和24,967 m²,修正后游憩展示区、生态保育区、传统利用区的面积分别为121,784 m²、47,314 m²和10,902 m²。根据修正面积变化混淆矩阵,游憩展示

区24,263 m²调整为生态保育区,生态保育区13,866 m²调整为游憩展示区,游憩展示区14,743 m²调整为传统利用区,传统利用区678 m²调整为游憩展示区(表1)。

按照古田山访客中心周边天然林和人工经济林的林缘线,划定了较为精确的游憩展示区、生态保育区和核心保护区3个分区的界线(图4d)。根据实际用地情况修正后的功能分区中,北侧的天然林属于古田山自然保护区,以木荷 + 青冈为优势种,群落总郁闭度达到0.9,属于核心保护区,中部的古田山庄、访客中心、运动场、道路等人工设施及人工绿化带主要为访客提供交通、住宿等服务,受人为影响较大,属于游憩展示区,南侧的天然林以木荷 + 甜槠为优势种,群落总郁闭度达0.85,属于生态保育区(图4e)。功能分区边界线以人工经济林、人工设施与天然林为主要依据;本研究修正总面积19,667 m²(图4f),修正前游憩展示区、生态保育区、核心保护区的面积分别为62,155 m²、21,641 m²和36,204 m²,修正后游憩展示区、生态保育区、核心保护区的面积分别为69,848 m²、12,502 m²和37,650 m²。根据修正面积变化混淆矩阵,游憩展示区4,541 m²调整为核心保护区,核心保护区5,987 m²调整为游憩展示区,游憩展示区9,139 m²调整为生态保育区(表2)。

表1 横岭角功能分区修正面积(m²)混淆矩阵

Table 1 Confusion matrix of function partition in Henglingjiao (m²)

	修正前游憩展示区 Recreation display area before revision	修正前生态保育区 Ecological conserve- ation area before rev- ision	修正前传统利用区 Traditional use area before revision	修正前分区总计 Total original func- tional partition
修正后游憩展示区 Recreation display area after revision	82,778	24,263	14,743	121,784
修正后生态保育区 Ecological conservation area after revision	13,866	33,448	—	47,314
修正后传统利用区 Traditional use area after revision	678	—	10,223	10,902
修正后分区总计 Total corrected functional partition	97,322	57,711	24,967	180,000

表2 古田山访客中心功能分区修正面积(m²)混淆矩阵

Table 2 Confusion matrix of function partition in Gutianshan visitor center (m²)

	修正前游憩展示区 Recreation display area before revision	修正前生态保育区 Ecological conserve- ation area before rev- ision	修正前核心保护区 Core protection area before revision	修正前分区总计 Total original func- tional partition
修正后游憩展示区 Recreation display area after revision	56,168	9,139	4,541	69,848
修正后生态保育区 Ecological conservation area after revision	—	12,502	—	12,502
修正后核心保护区 Core protection area after revision	5,987	—	31,662	37,650
修正后分区总计 Total corrected functional partition	62,155	21,641	36,204	120,000

4 讨论

本研究以钱江源国家公园试点区为例, 通过对功能分区和潜在干扰区进行分析, 筛选出目前功能分区中可能存在不足的典型区域, 采用无人机与地面调查相结合的手段, 从保护当地生态系统完整性和减小人为干扰因素的角度出发, 使得功能分区和边界划分更为合理, 为现有的功能分区边界划分与细化提供了一种可行的方法。得到的主要启示有:

(1) 选择具有代表性的典型区域是利用近低空遥感技术进行功能分区边界识别的前提。由于无人机航拍区域一般较小, 选择合适的研究区尤为重要。按照处于功能分区边界和存在较大干扰两个原则, 同时排除河流和道路等明显的干扰因子, 在国家公园范围内筛选出典型区, 并对其进行植被、地形、人为干扰等因子的实地考察, 配合无人机航拍对重点地区进行判别。

(2) 功能分区设计中人为干扰较大的区域(如人工梯田、人工林)与自然地物(如天然林)较难分辨, 可能被错误划分。错误划分原因包括: ①典型区部分人工林长势较好, 由于缺乏实地调研, 导致对人工林、天然林的判断产生误差; ②人工梯田和人工林均覆有植被, 同时梯田的边缘较为曲折, 两者交叉重叠, 给区分带来难度。库坑村横岭角修正面积达到航拍范围的29.75%, 其中, 将人为活动较多的游憩展示区修正为生态保育区和传统利用区的面积分别占总面积的13.48%和8.19%, 将生态保育区和传统利用区调整为游憩展示区的面积分别占总面积的7.70%和0.38%。

(3) 功能分区设计中, 部分边界区域划分没有考虑生态系统的完整性, 将面积较小或完整性稍差的天然林划分为游憩展示区、传统利用区等保护级别较低的区域。古田山访客中心修正面积达到航拍范围的16.39%, 其中, 将核心保护区修正为游憩展示区的面积占总面积的4.99%, 将游憩展示区修正为核心保护区和生态保育区的面积分别占总面积的3.78%和7.62%。在国家公园功能分区中, 典型区的植被生态系统完整性应从天然林、人工林、人工绿化等角度加以区分。

(4) 无人机航拍具有影像采集方便灵活、图像空间分辨率高、高程精细和运行成本低等卫星和航空遥感不具备的优势, 但在实践中也存在难点, 钱江

源国家公园山区地形复杂, 植被盖度较高, 部分地区控制点布设存在难度, 造成后期部分影像拼接与处理存在一定的偏差, 这方面需要配合高分影像及实地调查进行验证。

5 对策建议

(1) 大多数自然保护地边界识别采用卫星影像结合多因素加权的方法确定功能分区, 运用层次分析法、聚类分析及GIS技术对自然保护地生态敏感性、生态功能区进行评价(白雪等, 2008; 王娟等, 2012)。这一方法在保护地尺度上可以进行快速分区, 但部分典型区域精确度不够, 后期针对受地形、植被、土壤等影响较大的区域以及随时间推移人为干扰等可能发生较大变化的区域, 需要通过近低空遥感的手段和地面调查结合的方法进行修正。

(2) 本研究提出以现有功能分区为评判依据, 划分潜在干扰区, 利用无人机遥感技术结合实地调查功能分区典型区, 识别现有功能分区中存在的主要问题, 有助于提高功能分区的科学性。本方法依然适用于其他国家公园的功能分区边界识别与精确划分。

未来基于近低空遥感技术在国家公园功能分区的研究可以选择更多典型区, 扩大本方法的验证范围, 对植被、河流等显著的环境因子和道路、村庄等显著的人为因子分别进行验证, 探究各类要素对功能分区边界的影响。同时利用无人机便捷获取数据的优势, 在季相变化明显的典型区获取不同季节物候景观图像, 推进国家公园功能分区动态监测与识别。

致谢: 感谢钱江源国家公园管理委员会和开化县发展和改革局对本研究的大力支持, 感谢郭鑫、何宗菲在野外调查中给予的帮助, 感谢张中浩、张晨老师对论文提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- Bai X, Ma KM, Yang L, Zhang JY, Zhang XL (2008) Ecological function differences inside and outside the wetland nature reserves in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 620–626. (in Chinese with English abstract) [白雪, 马克明, 杨柳, 张洁瑜, 张小雷 (2008) 三江平原湿地保护区内外的生态功能差异. *生态学报*, 28, 620–626.]

- Fu MD, Tian JL, Zhu YP, Tian Y, Zhao ZP, Li JS (2017) Identification of functional zones and methods of target management in Sanjiangyuan National Park. *Biodiversity Science*, 25, 71–79. (in Chinese with English abstract) [付梦娣, 田俊量, 朱彦鹏, 田瑜, 赵志平, 李俊生 (2017) 三江源国家公园功能分区与目标管理. 生物多样性, 25, 71–79.]
- Guo QH, Hu TY, Jiang YX, Jin SC, Wang R, Guan HC, Yang QL, Li YM, Wu FF, Zhai QP, Liu J, Su YJ (2018) Advances in remote sensing application for biodiversity research. *Biodiversity Science*, 26, 789–806. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 胡天宇, 姜媛茜, 金时超, 王瑞, 关宏灿, 杨秋丽, 李玉美, 吴芳芳, 翟秋萍, 刘瑾, 苏艳军 (2018) 遥感在生物多样性研究中的应用进展. 生物多样性, 26, 789–806.]
- Guo QH, Wu FF, Hu TY, Chen LH, Liu J, Zhao XQ, Gao S, Pang SX (2016) Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity. *Biodiversity Science*, 24, 1267–1278. (in Chinese with English abstract) [郭庆华, 吴芳芳, 胡天宇, 陈琳海, 刘瑾, 赵晓倩, 高上, 庞树鑫 (2016) 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望. 生物多样性, 24, 1267–1278.]
- Huang LL, Zhu Q, Chen T (2007) Comparison of zoning models in protected natural areas overseas and its enlightenment. *Tourism Tribune*, 22(3), 18–25. (in Chinese with English abstract) [黄丽玲, 朱强, 陈田 (2007) 国外自然保护地分区模式比较及启示. 旅游学刊, 22(3), 18–25.]
- Huyan JQ, Xiao J, Yu BW, Xu WH (2014) Research progress in function zoning of nature reserves in China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6391–6396. (in Chinese with English abstract) [呼延佼奇, 肖静, 于博威, 徐卫华 (2014) 我国自然保护区功能分区研究进展. 生态学报, 34, 6391–6396.]
- Liang JC, Ding ZF, Zhang CL, Hu HJ, Duo HR, Tang H (2017) Bird diversity spatial distribution patterns and hotspots in Maixiu Area of Sanjiangyuan National Nature Reserve, Qinghai Province. *Biodiversity Science*, 25, 294–303. (in Chinese with English abstract) [梁健超, 丁志锋, 张春兰, 胡慧建, 朵海瑞, 唐虹 (2017) 青海三江源国家级自然保护区麦秀分区鸟类多样性空间格局及热点区域研究. 生物多样性, 25, 294–303.]
- Lu B, He YH (2017) Species classification using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 73–85.
- Puliti S, Ene LT, Gobakken T, Næsset E (2017) Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 194, 115–126.
- Tang XP (2014) On the system of national parks and the path of development in China. *Biodiversity Science*, 22, 427–430. (in Chinese with English abstract) [唐小平 (2014) 中国国家公园体制及发展思路探析. 生物多样性, 22, 427–430.]
- Tang XP, Luan XF (2017) Developing a nature protected area system composed mainly of national parks. *Forest Resources Management*, (6), 1–8. (in Chinese with English abstract) [唐小平, 栾晓峰 (2017) 构建以国家公园为主体的自然保护地体系. 林业资源管理, (6), 1–8.]
- Tian JY, Wang L, Li XJ, Gong HL, Shi C, Zhong RF, Liu XM (2017) Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61, 22–31.
- Wang J, Han ZJ, Peng PH, Chen WD, Chen YF (2012) Eco-sensitivity evaluation and functional zoning of Gongbu Nature Reserve in Tibet. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, (6), 98–101. (in Chinese with English abstract) [王娟, 韩子钧, 彭培好, 陈文德, 陈颖峰 (2012) 工布自然保护区生态敏感性评价及功能区划. 河南师范大学学报(自然科学版), (6), 98–101.]
- Wu CZ, Yang HN, Zhang YQ (2017) Behaviour analysis based function zoning model for national park in China—Taking Dashanbao National Park in Yunnan Province as an example. *Environmental Protection*, 45(14), 21–27. (in Chinese) [吴承照, 杨浩楠, 张颖倩 (2017) 行为分析方法与国家公园功能分区模式——以云南大山包国家公园为例. 环境保护, 45(14), 21–27.]
- Wu YL, Chen JP, Yao SP, Xu B (2017) Application of UAV low-altitude remote sensing. *Remote Sensing for Land and Resources*, 29(4), 120–125. (in Chinese with English abstract) [吴永亮, 陈建平, 姚书朋, 徐彬 (2017) 无人机低空遥感技术应用. 国土资源遥感, 29(4), 120–125.]
- Yan GT, Shen H (2015) Study on planning system of national park series of China. *Chinese Landscape Architecture*, 31(2), 15–18. (in Chinese with English abstract) [严国泰, 沈豪 (2015) 中国国家公园系列规划体系研究. 中国园林, 31(2), 15–18.]
- Yang R, Cao Y (2017) How to promote the construction of national parks? Promoting scientific awareness and supporting scientific research. *Man and the Biosphere*, (4), 28–29. (in Chinese) [杨锐, 曹越 (2017) 怎样推进国家公园建设? 科学意识提升科学研究支撑. 人与生物圈, (4), 28–29.]
- Yu H, Chen T, Zhong LS, Zhou R (2017) Functional zoning of the Qianjiangyuan National Park System Pilot Area. *Resources Science*, 39, 20–29. (in Chinese with English abstract) [虞虎, 陈田, 钟林生, 周睿 (2017) 钱江源国家公园体制试点区功能分区研究. 资源科学, 39, 20–29.]
- Zhang LB, Luo ZH, Mallon D, Li CW, Jiang ZG (2017) Biodiversity conservation status in China's growing protected areas. *Biological Conservation*, 210, 89–100.
- Zhang LY, Ye WH, Huang ZL (2006) Assessment of function area design in Dinghushan Biosphere Reserve using landscape ecology principles. *Biodiversity Science*, 14, 98–106. (in Chinese with English abstract) [张林艳, 叶万辉, 黄忠良 (2006) 应用景观生态学原理评价鼎湖山自然保护区功能区划的实施与调整. 生物多样性, 14, 98–106.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 闫文杰)