

郭珂, 牛香, 王兵, 孟广涛, 宋庆丰. 2022. 基于 GIS 的云南省森林生态连清体系野外观测网络布局. 生态学杂志, 41(8): 1457-1465.

Guo K, Niu X, Wang B, Meng GT, Song QF. 2022. A GIS-based study on the layout of field observation network of forest ecological inventory system in Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 41(8): 1457-1465.

基于 GIS 的云南省森林生态连清体系 野外观测网络布局

郭珂^{1,2,3,4} 牛香^{2,3,4} 王兵^{1,2,3,4*} 孟广涛⁵ 宋庆丰^{2,3,4}

(¹北京林业大学信息学院, 北京 100083; ²中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091; ³国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; ⁴江西大岗山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 江西新余 336600; ⁵云南省林业与草原科学研究院, 昆明 650000)

摘要 森林生态连清体系野外观测网络的建设可为森林生态过程研究、服务功能评估及价值化实现提供数据支持, 促进提升森林生态系统质量和碳中和能力。本研究根据影响森林生态功能的驱动因素构建指标体系(温度、水分、植被类型、地形和生态功能区), 采用 GIS 空间分析技术生成森林生态区划, 并结合森林生态站布局思路, 构建了云南省森林生态连清体系野外观测网络, 从森林、重点生态功能区、生物多样性保护优先区层面评价了网络布局的监测精度。结果表明: 云南省森林生态区划包括 22 个不同的森林生态区; 共布设 31 个森林生态站(6 个重点站、11 个基本站、14 个监测站), 其中包括 22 个拟建站和 9 个已建站; 该网络在森林、重点生态功能区、生物多样性保护优先区层面的监测精度分别为 94.29%、94.76% 和 87.99%, 且 25 个森林生态站分布与云南省 3 个重点生态功能区和 2 个生物多样性保护优先区相匹配。该网络可以实现云南省森林生态系统要素的连续观测与清查, 为森林生态服务功能和生态效益评估提供数据支持, 并为重大林业生态工程和国际履约提供辅助决策依据。

关键词 森林生态区划; GIS; 空间分析; 网络布局; 监测精度评价

A GIS-based study on the layout of field observation network of forest ecological inventory system in Yunnan Province, China. GUO Ke^{1,2,3,4}, NIU Xiang^{2,3,4}, WANG Bing^{1,2,3,4*}, MENG Guang-tao⁵, SONG Qing-feng^{2,3,4} (¹School of Information Science & Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ³Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; ⁴Dagangshan National Key Field Observation and Research Station for Forest Ecosystem, Xinyu 336600, Jiangxi, China; ⁵Yunnan Academy of Forestry and Grassland Science, Kunming 650000, China).

Abstract: The construction of a field observation network for forest ecological inventory system (FON-FEIS) can provide data support for the research of forest ecological processes, the assessment of ecological functions and the delivery of ecological values, thus promoting the improvement of forest ecosystem quality and its carbon neutral capacity. Currently, the lack of long-term, standardized ecological data is one of the major constraints on the effective assessment of ecological benefits and the implementation of ecological restoration projects. It is therefore critically needed to develop a FON-FEIS for Yunnan Province, China. Firstly, an index system, involving temperature, water, vegetation type, terrain, and functional ecological zone, was constructed based on the factors driving forest ecosystem functions. Then, GIS spatial analysis technology was used to identify forest ecological zones. Finally, the FON-FEIS in Yunnan Province was constructed in combination with the layout idea of forest ecological stations, while the monitoring accuracy of the network layout was evaluated from the perspectives of forests, key ecological function zones, and priority zones for biodiversity conservation. The results showed that the optimal FON-FEIS was achieved when Yunnan Province was divided into 22 forest ecological regions and 31 forest ecological stations were deployed, including 6 key stations, 11 basic stations, and 14 monitoring stations. Currently, 22 stations are under planning and 9 stations were established. Within this network, the accuracy of monitoring reached as high as

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020ZD002-2)、国家林业和草原局委托项目“国家林草生态综合监测(130207-21-102)”和“中国森林资源核算及林业绿色发展研究(91212-2021)”资助。

收稿日期: 2021-07-07 接受日期: 2022-03-07

* 通讯作者 E-mail: wangbing@caf.ac.cn

94.29%, 94.76% and 87.99% on the levels of forest, key ecological function area, and biodiversity conservation priority area, respectively. The distribution of 25 forest ecological stations matched that of the three key ecological function areas and two biodiversity conservation priority areas in Yunnan Province. In conclusion, this network enables the effective, continuous observation and inventory of forest ecosystems in Yunnan Province, which provides not only the requisite data for the assessment of forest ecological function and ecological benefits, but also the important information to assist decision-making for major ecological projects and international fulfillment.

Key words: forest ecological zoning; GIS; spatial analysis; network layout; monitoring accuracy evaluation.

森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,发挥着保育土壤、林木养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气环境和防风固沙等生态服务功能(赵同谦等,2004;王兵等,2011;Eliáš *et al.*,2017),在缓解水土流失和荒漠化、持续改善环境质量、达成2060年前实现“碳中和”的目标中发挥着关键作用。此外,建立健全生态产品价值实现机制,已成为我国生态文明建设、化“绿水青山”为“金山银山”的重要举措(中共中央办公厅、国务院办公厅,2021)。森林生态系统作为绿水青山的重要一环,在为人类提供生态产品支持的同时发挥着重要的生态服务功能,与人类福祉息息相关(Costanza *et al.*,1997;赵士洞等,2006;王兵等,2011)。量化森林生态系统生态产品和生态服务功能,掌握森林生态系统提供的人类福祉是树立并提高人类保护森林、保护生态意识的有效途径,有利于生态文明建设。然而,探索森林生态系统生态产品和生态服务功能的价值化实现路径的最大制约因素在于基础生态参数(国家林业局,2017)的获取。王兵等(2020)提出的森林生态系统服务的全指标体系连续观测与清查技术体系简称森林生态连清技术体系,由野外观测连清体系和分布式测算研究体系两部分构成,其提出和构建充分考虑了森林生态状况的监测与森林资源监测的耦合,将森林资源清查、生态参数观测调查、指标体系和价值评估方法集于一套框架中,为核算绿水青山价值多少金山银山提供了技术依据。森林生态连清体系野外观测网络(Field observation network of forest ecological inventory system, FON-FEIS)中的森林生态系统长期定位观测研究站(简称生态站)通过对森林生态系统进行长期定位观测,可以获取长期系统化、标准化的生态参数,因此构建 FON-FEIS 具有重要意义。

世界上许多国家已开展了生态系统长期定位观测,并逐渐由单独生态定位站发展为生态系统定位观测研究网络,如美国长期生态系统研究网络(United States Long-Term Ecological Research, US-LTER)(Hobbie *et al.*,2003)、英国环境变化网络

(Environment Change Network, ECN)(Miller *et al.*,2001)、加拿大生态监测和评估网络(Ecological Monitoring and Assessment Network(Canada), EMAN)(Vaughan *et al.*,2001)等,为研究生态学、环境科学、全球气候变化与影响、可持续发展等重要理论及实践给予数据支持。国际上众多国家尺度的长期监测网络中,US-LTER 和 ECN 最为著名,二者的突出特点是均非常注重观测的标准化以及监测数据的规范化共享。中国于20世纪50年代开始长期生态定位观测研究,经过几十年的发展,到2021年初步形成了以森林、湿地、荒漠、竹林、城市生态系统为一体的陆地生态系统定位观测研究网络(Chinese Terrestrial Ecosystem Research Network, CTERN)。其中,森林生态系统定位观测研究网络(Chinese Forest Ecosystem Research Network, CFERN)共包括106个森林生态站,成为横跨35个纬度的全国性观测研究网络(Niu *et al.*,2013),同时构成了 FON-FEIS。另外,我国《森林生态系统长期定位观测方法》(GB/T 33027—2016)、《森林生态系统长期定位观测指标体系》(GB/T 35377—2017)、《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020)和《森林生态系统长期定位观测研究站建设规范》(GB/T 40053—2021)一系列标准体系的发布实施,标志着 FON-FEIS 从生态站建设到观测指标、观测方法再到生态服务功能评估的规范化和标准化,在未来应加强生态站监测数据的智能化管理和标准化共享。

然而,FON-FEIS 的重点研究内容随网络尺度的变化各有侧重(Lindenmayer *et al.*,2010)。例如,全球、区域和国家尺度的 FON-FEIS 致力于解决重大生态问题和集成研究,旨在为保护生态环境、应对气候变化以及国际履约等提供决策理论依据(郭慧等,2015)。省域尺度的 FON-FEIS 主要研究生态学热点问题、重点林业生态工程的生态效益、森林生态服务功能以及生态产品价值化实现路径,旨在揭示该区域森林生态系统的结构与功能特征、演变过程及影响机制,评价重点林业生态工程发挥的生态效益,建立森林生态服务功能与生态需求的协调机制,

探索森林生态产品价值的实现路径。目前,上海市、广东省和山西省等省份已进行了省域尺度上的 FON-FEIS 布局研究,但布局指标体系因地制宜,其中上海市经纬度跨度小,各区域在温度、降水等因子方面的异质性小,主要考虑了地貌指标、土壤指标、植被指标和生态规划指标(韩玉洁等,2018);广东省是首个涵盖森林、湿地、城市、石漠四大陆地生态系统的省级 FON-FEIS,重点考虑了气候指标、流域指标、植被指标、土壤指标、地形地貌和生态功能区指标(甘先华等,2020);山西省 FON-FEIS 是针对主要水系森林生态系统和重点林业工程的监测网络,重点考虑了典型森林生态系统、水系分布和重点林业工程分布等因素(孙拖焕等,2019)。

云南省地处全球 34 个生物多样性热点地区,是保护中国珍稀动植物资源的重要阵地,独特的地理位置造就了生态系统类型的多样性,物种的丰富度世界瞩目,是全球开展森林生态学研究的不可多得之地。此外,云南省是天然林保护工程、退耕还林工程等重大林业生态工程的重要实施地区,而 FON-FEIS 生态站只有 9 个,既无法满足全部典型森林生态系统生态产品价值实现路径和生态服务功能评估研究的需要,又不能科学准确评估重点林业生态工程生态效益。因此,需要构建云南省 FON-FEIS。

鉴于此,本文基于 GIS 技术,以典型抽样思想为指导,综合考虑气候、植被、地形和生态功能区等云南省森林生态功能分异的主要驱动因子,获取云南省森林生态区划,构建 FON-FEIS 并分析其监测精度,讨论了生态站的重点研究内容、时代需求和局限性,以期为其他省份构建更加科学合理的 FON-FEIS 提供方法依据。

1 研究区概况

云南省地处中国西南边陲,位于 $90^{\circ}31'E-106^{\circ}11'E, 21^{\circ}08'N-29^{\circ}15'N$,属山地高原地形,且河川纵横,湖泊众多,总面积 39.4 万 km^2 。该区域气候复杂多样,基本属亚热带高原季风气候,年均气温 $6\sim 22^{\circ}\text{C}$,年降水量 $584\sim 2700 \text{ mm}$ 。云南省主要森林类型复杂多样,包括季雨林、针叶林、常绿阔叶林、针阔混交林、阔叶混交林、稀树灌木草丛和经济林。截至目前,云南省 FON-FEIS 已建有生态站 9 个,分别是西双版纳热带雨林生态系统定位研究站(西双版纳站, Xishuangbanna station)、哀牢山亚热带森林生态系统定位研究站(哀牢山站, Ailaoshan

station)、丽江森林生态系统定位研究站(丽江站, Lijiang station)、高黎贡山森林生态系统定位研究站(高黎贡山站, Gaoligongshan station)、玉溪森林生态系统定位研究站(玉溪站, Yuxi station)、普洱森林生态系统定位研究站(普洱站, Puer station)、滇中高原森林生态系统定位研究站(滇中高原站, Dianzhong plateau station)、滇东南热带山地森林生态系统定位研究站(滇东南站, Diandongnan station)和滇南竹林生态系统定位研究站(滇南竹林站, Diannan bamboo station)(图 1)。

2 研究方法

长期定位观测研究应在有典型生态代表性的区域进行(Strayer *et al.*, 1986),而典型抽样是挑选若干有典型代表性的样本进行研究,因此本文以典型抽样思想为指导进行云南省 FON-FEIS 布局研究,即选取典型有代表性的地点布设生态站进行长期定位观测。典型抽样方法中,空间异质性分层抽样是将总体单位按照其属性特征划分为若干同质类型或层,然后在类型或层中随机抽取样本单位。该方法适用于总体情况复杂、各单位之间差异较大和单位较多的情况(李杨, 2010)。森林生态系统结构复杂,符合分层抽样的要求,且当层间差异较大、层内差异较小时,该抽样方法能够显著提高估计精度,将空间异质性分层抽样思想应用于云南省 FON-FEIS 布局研究,既体现了森林生态系统的全面性,又兼顾了森林生态系统的典型性。因此,空间异质性分层抽样是进行云南省 FON-FEIS 布局研究的合适方法。

2.1 数据来源与处理

采用的数据主要包括:云南省气象站温度和降雨量日值数据,来源于中国科学院资源环境科学数

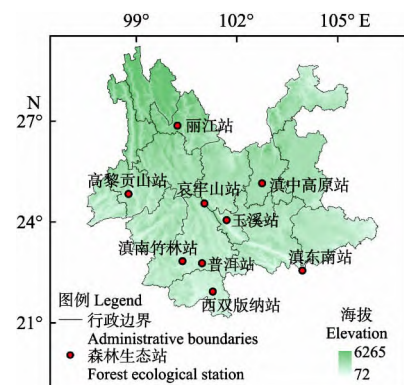


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

据中心(<https://www.resdc.cn/>);地形区划数据,来源于云南省林业和草原科学研究院;植被区划矢量数据,来源于《中国植被》的植被区划和植被图(张新时,2007);重点生态功能区,来源于《全国主体功能区规划》(中华人民共和国国务院,2010);生物多样性保护优先区,来源于《中国生物多样性保护战略与行动计划》(中华人民共和国环境保护部,2010);云南省行政区划和数字高程模型(DEM),均来源于中国科学院资源环境科学数据中心。

利用气象站温度和降雨量日值数据处理分析得到年积温、积温天数和年均降雨量数据,并通过普通克里格法对其进行空间插值;利用DEM数据对地形区划数据进行校正;利用云南省行政区划通过 Arc-GIS 裁剪工具提取云南省温度、降雨量、植被和主导生态功能区划数据。

2.2 指标体系

区划是具有明确目标的反映区域自然属性及其变异规律的一种地理分析方式,其目标是决定区划方法与区划指标的核心(蔡佳亮等,2010)。本研究选取云南省森林生态系统产生分异的主要驱动因子来构建云南省森林生态区划指标体系,主要包括气候、植被类型、地形因子和主导生态功能区等因子。其中温度采用对植物生长发育具有重要指示作用的年积温和积温天数(日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)为指标,水分指标采用干燥度指数来衡量(郑度,2008);植被类型指标采用中国植被区划的第五级区划,这是由于该级区划侧重局部水热状况、中等地形单元造成的植被分异,并且根据优势植被分类单元进行区划;地形指标选择经DEM校正后的地形区划,该区划将云南省分为6个分区,分别为滇东南喀斯特中小起伏中山、滇西南高中山、滇中中高山盆地、黔北喀斯特中起伏中山、桂西喀斯特中/小起伏低山盆地和横断山极大/大起伏高山;主导生态功能指标包括重点生态功能区和生物多样性保护优先区,云南省重点生态功能区有桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区和川滇森林及生物多样性生态功能区,生物多样性保护优先区包括横断山南段生物多样性保护优先区、苗岭—金钟山—凤凰山生物多样性保护优先区和西双版纳生物多样性保护优先区。

2.3 森林生态区划

Kriging 方法在气象方面的使用最为常见,主要可对降水、温度等要素进行最优内插,本研究中可使用该方法对省域尺度气象数据进行分析。由于球状模型用于普通克里格插值精度最高,且优于常规插

值方法(何亚群等,2008),因此本文采用球状模型进行变异函数拟合,获得省域尺度降水、温度等要素的最优内插。球状模型见公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \times \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$

式中: C_0 为块金效应值,表示 h 很小时两点间变量值的变化; C 为基台值,反映变量在研究范围内的变异程度; a 为变程; h 为滞后距离。

基于球状模型通过普通克里格法构建云南省温度和干湿指数区划,并通过GIS叠加分析获得云南省气候区划。将云南省气候区划、地形地貌区划(经DEM校正)和植被区划进行GIS空间叠置分析,指标图层完全重合部分即为相对均质区域。由于某些相对均质区域面积过小,表现出破碎化,不适合作为FON-FEIS的目标靶区。因此,采用合并标准指数法或长边合并原则将破碎部分合并到相邻区域,生成相应的目标靶区(郭慧,2014)。若在目标靶区布设森林生态站后,该生态站的实际监测范围是该森林生态分区的相对均质区域,不能监测的区域是非均质区域,即该森林生态分区中的破碎部分。

不同的目标靶区个数,监测精度不同,为选择最适宜个数的目标靶区,利用相对误差方法对不同的目标靶区个数的监测范围进行监测精度评价,监测精度计算公式为:

$$P = 1 - |X - T| / T$$

式中: P 为监测精度; X 为森林生态站网络可监测面积; T 为森林生态区划中的实有面积。根据监测精度选取合适的目标靶区个数,从而获取云南省森林生态区划。

将重点生态功能区、生物多样性保护优先区和云南省行政区划数据进行GIS空间叠置分析,提取森林生态功能类型,空间合并相同属性后获取云南省森林生态功能区划。

2.4 网络构建与精度评价

基于云南省森林生态区划,进行FON-FEIS布局,布局思路如下:

(1) 为保证FON-FEIS能够监测到所有森林类型,每个森林生态分区应该至少布局1个森林生态站。若该森林生态分区已经建设有森林生态站,则将其纳入FON-FEIS规划,不再布设其他森林生态站;反之,则需要重新布设森林生态站。

(2) 在没有建设森林生态站的森林生态分区,优

先考虑该森林生态分区中的生态功能区,利用 ArcGIS 中的 Feature To Point(Inside) 功能提取生态功能区的空间内部中心点布局森林生态站。若生态功能区面积不足该森林生态分区面积的 50%,则除了在生态功能区内布局生态站,还需要提取生态功能区外区域的空间内部中心点补充布设森林生态站。

(3) 若该森林生态分区内既没有已经建设的森林生态站,也不在生态功能区的范围内,则直接提取该森林生态分区的空间内部中心点布设森林生态站。

(4) 根据生态区位重要性及生态站建设水平,将森林生态站划分为重点站、基本站和监测站 3 个级别,其中重点站的重要性高于基本站,基本站的重要性高于监测站,优先对重点站进行建设。重点站的区域典型性、代表性和地域特色明显,除满足对生态参数的观测需求外,能够紧跟生态学研究前沿,回答生态建设的重大科学问题,且具有一定的示范和带动作用;基本站具有稳定的科研队伍,能够进行森林生态站间的多站点联合研究;监测站只需完成对生态指标的观测,以获取生态参数。

基于以上布局思路完成云南省 FON-FEIS 的构建,并分别从森林、重点生态功能区、生物多样性保护优先区的角度,利用相对误差方法对每个森林生态分区的监测精度进行评价。

3 结果与分析

3.1 云南省森林生态区划

将云南省气候区化、地貌类型区划和植被区划进行空间叠置分析,叠加结果将云南省划分为 43 个生态区。当目标靶区数分别为 17、22、33、43 时,监测精度分别为 79.55%、94.29%、99.53% 和 100%。为保证监测范围覆盖云南省全部植被类型,监测精度高,且避免分区过度破碎化(郭慧,2014),最适宜的目标靶区个数为 22,因此将云南省划分为 22 个森林生态站长期定位观测布局规划的有效分区,即云南省森林生态区划(图 2)。生态分区命名方法为气候区划(温度+水分)+植被区划+编号。其中温度带 I: 日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温日数 50~180 d; II: 日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 5100~6400 $^{\circ}\text{C}$, 积温天数 240~285 d; III: 日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 6400~8000 $^{\circ}\text{C}$, 积温天数 285~365 d; IV: 日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 8000~9000 $^{\circ}\text{C}$, 积温天数 365 d; A: 干湿指数 ≤ 0.99 , 属于湿润地区; B: 干湿指数 1.00~1.49, 属于半湿润地区。植被类型 a: 半常绿季雨林、湿润雨林区; b: 润楠、青冈栎、细叶云南松林区; c: 季雨林区; d: 半常绿季雨林

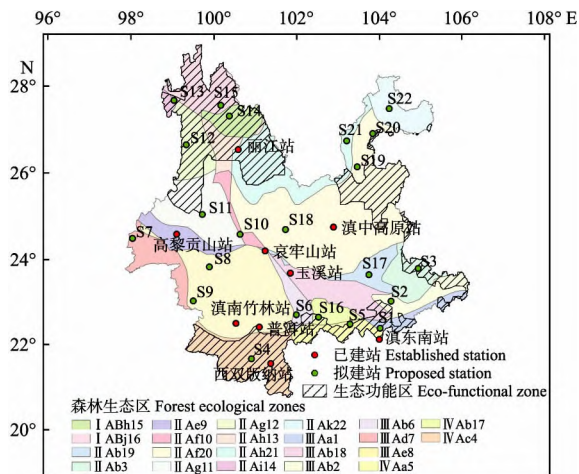


图 2 云南省森林生态连清体系野外观测网络布局

Fig.2 Layout of field observation network of forest ecological inventory system in Yunnan Province

区; e: 栲类、红木荷、思茅松林区; f: 滇青冈、栲类、云南松林区; g: 铁杉、冷杉垂直带的森林区; h: 云南松林、干热河谷植被区; i: 察隅长毛羯布罗香、红果葱臭木、栲、红木荷小区; j: 云杉、冷杉林、硬叶栎林区; k: 栲类、木荷林区。

3.2 森林生态站网络布局

根据 FON-FEIS 布局思路对云南省 FON-FEIS 进行规划布局,结果表明,云南省需要布设 31 个森林生态站(图 2),并依据生态区位重要性及生态站建设水平将 31 个生态站划分为 6 个重点站(西双版纳站、普洱站、高黎贡山站、哀牢山站、滇中高原站和针对退耕还林工程拟建于会泽的 S19), 11 个基本站和 14 个监测站,占比分别为 19.35%、35.48% 和 45.16%。已经建设 9 个森林生态站,生态站站名分别是丽江站、高黎贡山站、哀牢山站、滇中高原站、滇东南站、西双版纳站、玉溪站、普洱站、滇南竹林站;拟建设 22 个森林生态站,生态站命名编码为 S1—S22; 各个森林生态站站点的位置如表 1 所示。

云南省 FON-FEIS 站点的空间分布表现为滇西南(7 个)、滇西北(5 个)、滇南(5 个)、滇东南(4 个)、滇东北(3 个)、滇西(3 个)、滇中(3 个)和滇东(1 个)。从布设密度而言,滇西南和滇西北地区的生态站相对密集,其他地区则相对均衡。究其原因,云南省森林资源的空间分布和生态功能区是主要的影响因素。具体而言,滇西南和滇西北地区是云南省森林资源的主要分布区,森林分布远多于其他地区,森林覆盖率可达 60% 以上,因而布局生态站相对较多。此外,云南省 3 个重点生态功能区和 3 个生物多样性保护优先区主要分布在滇南、滇东南、滇

表1 云南省森林生态连清体系野外观测网络生态站站名

Table 1 Ecological station sites in the field observation network of forest ecological inventory system in Yunnan Province

分区 Zones	站名 Station name	级别 Level	位置 Location	区域 Region
III Aa1	S1	MS	马关县 Maguan County	滇东南 Southeast Yunnan
III Ab2	S2	BS	文山市 Wenshan City	滇东南 Southeast Yunnan
II Ab3	S3	MS	广南县 Guangnan County	滇东南 Southeast Yunnan
IV Ac4	S4	BS	景洪市 Jinghong City	滇南 South Yunnan
IV Aa5	西双版纳站 Xishuangbanna station	KS	勐腊县 Mengla County	滇南 South Yunnan
	S5	BS	金平县 Jinping County	滇南 South Yunnan
III Ab6	滇东南站 Diandongnan station	BS	屏边县 Pingbian County	滇南 South Yunnan
	S6	MS	景谷县 Jinggu County	滇西南 Southwest Yunnan
III Ad7	S7	MS	瑞丽县 Ruili County	滇西 Western Yunnan
III Ae8	S8	MS	永德县 Yongde County	滇西南 Southwest Yunnan
	S9	MS	沧源县 Cangyuan County	滇西南 Southwest Yunnan
II Ae9	滇南竹林站 Diannan bamboo station	BS	普洱市 Puer City	滇西南 Southwest Yunnan
	普洱站 Puer station	KS	普洱市 Puer City	滇西南 Southwest Yunnan
	高黎贡山站 Gaoligongshan station	KS	保山市 Baoshan City	滇西南 Southwest Yunnan
II Af10	哀牢山站 Ailaoshan station	KS	景东县 Jingdong County	滇西南 Southwest Yunnan
	S10	BS	南涧县 Nanjian County	滇西 Western Yunnan
II Ag11	S11	MS	永平县 Yongping County	滇西 Western Yunnan
II Ag12	S12	MS	福贡县 Fugong County	滇西北 Northwest Yunnan
II Ah13	丽江站 Lijiang station	BS	丽江市 Lijiang City	滇西北 Northwest Yunnan
II Ai14	S13	MS	贡山县 Gongshan County	滇西北 Northwest Yunnan
I ABh15	S14	BS	香格里拉县 Xianggelila County	滇西北 Northwest Yunnan
I ABj16	S15	MS	德钦县 Deqin County	滇西北 Northwest Yunnan
IV Ab17	S16	BS	绿春县 Lüchun County	滇南 South Yunnan
III Ab18	玉溪站 Yuxi station	BS	新平县 Xinping County	滇中 Central Yunnan
II Ab19	S17	MS	丘北县 Qiubei County	滇东南 Southeast Yunnan
II Af20	S18	MS	楚雄市 Chuxiong City	滇中 Central Yunnan
	滇中高原站 Dianzhong plateau station	KS	昆明市 Kunming City	滇中 Central Yunnan
	S19	KS	会泽县 Huize County	滇东北 Northeast Yunnan
	S20	BS	昭通市 Zhaotong City	滇东北 Northeast Yunnan
II Ah21	S21	MS	巧家县 Qiaojia County	滇东北 Northeast Yunnan
II Ak22	S22	MS	盐津县 Yanjin County	滇东北 Northeast Yunnan

注: KS: 重点站; BS: 基本站; MS: 监测站。

Notes: KS: Key stations; BS: Basic stations; MS: Monitoring stations.

西、滇西北、滇西南和滇东地区,共布设森林生态站25个,占FON-FEIS生态站总数的80.65%,保证了森林生态站站点分布与重点生态功能区和生物多样性保护优先区相匹配,表明该FON-FEIS可以有效监测云南省生态功能区内的森林生态系统。

3.3 森林生态连清体系野外监测网络监测精度

基于植被类型和生态功能区划矢量数据,从森林、重点生态功能区和生物多样性保护优先区3个层面分别对FON-FEIS的监测范围进行精度分析,结果如表2所示。总体而言,森林面积的总监测精度为94.29%,分区II Ab3、III Ad7、II Ag11、II Ai14、III Ab18、II Ab19、II Ah21的监测精度均达到了100%;分区IV Aa5、IV Ab17、II Ak22的监测精度较低,均在65%以下,原因在于这些地区地形地貌变化大,监测缺失较大。重点生态功能区面积的总监

测精度为94.76%,分区II Ag12、II Ah21、II Ak22的监测精度均达到了100%,监测精度较低的分区是IV Ac4,精度为89.59%,该分区部分区域处于普洱市和西双版纳州交界处,是南亚热带和边缘热带的过渡地带,气候变化较大。此外,分区IV Aa5的监测精度为0,这是由于该分区的重点生态功能区面积较小,属于破碎化区域。生物多样性优先区的总监测精度为87.99%,分区II Ab3、III Ab6、II Ag11、II Ai14、III Ab18、II Ah21的监测精度均达到了100%,分区IV Ab17和III Ae8的监测精度均较低,分别为2.10%和40.40%,这是由于两分区中的生物多样性优先区面积本身较小,且出于地形地貌复杂,破碎化程度高的缘故。对于监测精度低的区域,在建设资金充足的条件下,可以通过在未监测区域增设监测点进行改进或优化,以提高监测精度。

表 2 云南省森林生态连清体系野外观测网络监测精度(%)
Table 2 Monitoring accuracy of field observation network of forest ecological inventory system in Yunnan Province (%)

分区 Zones	森林 Forest	重点生态功能区 Key eco- function zone	生物多样性 保护优先区 Biodiversity conservation priority areas
Ⅲ Aa1	85.68	-	79.09
Ⅲ Ab2	93.96	-	86.13
Ⅱ Ab3	100	-	100
Ⅳ Ae4	86.57	89.59	84.21
Ⅳ Aa5	64.73	0	65.50
Ⅲ Ab6	99.65	-	100
Ⅲ Ad7	100	-	-
Ⅲ Ae8	80.18	-	40.40
Ⅱ Ae9	94.93	-	-
Ⅱ Af10	98.13	-	-
Ⅱ Ag11	100	-	100
Ⅱ Ag12	98.40	100	98.23
Ⅱ Ah13	80.95	93.83	1
Ⅱ Ai14	100	-	100
Ⅰ ABh15	96.29	96.22	95.42
Ⅰ ABj16	96.64	97.18	68.21
Ⅳ Ab17	63.92	-	2.10
Ⅲ Ab18	100	-	100
Ⅱ Ab19	100	-	-
Ⅱ Af20	98.59	97.82	-
Ⅱ Ah21	100	100	100
Ⅱ Ak22	64.80	100	-
总精度 Total accuracy	94.29	94.76	87.99

注 “-”表示该分区无此类别。

Note: “-”This zone does not have this category.

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 森林生态站的研究内容 森林生态站是获取并积累森林生态系统水、土、气、生等生态要素数据的重要野外科技平台,发挥着监测、研究、试验和示范的作用,对认清森林生态系统的演变历史、理解森林生态系统现状以及准确预测其未来演变趋势具有重要意义(杨萍等,2020)。目前,基于森林生态站长期定位观测数据,可以实现对森林生态系统物种结构、生态功能以及关键生态过程的研究,例如森林物种组成结构和生物多样性(吴文等,2018;吴红宝等,2019;吴昊等,2020;王泳腾等,2021)、森林生态系统的水文过程(乔玉娜等,2009;韩春等,2019)、碳汇功能(赵俊芳等,2018;冯源等,2020)和森林土壤微生物(曹润等,2019;王磊等,2020)等。随着 FON-FEIS 的发展和生态站长时间序列数据的积累,在未来应注重森林生态系统的多站点长期联

网观测以及跨时空尺度的比较研究,以揭示森林生态系统动态变化、功能演变以及生态过程的时空分异规律,在识别区域乃至国家尺度的生态系统格局、过程和服务发生变化的人为和自然驱动因子、科学制定生态系统管理和恢复对策的过程中发挥关键作用。此外,基于森林生态连清技术体系以及系列国家标准,更应注重将生态站观测数据与森林资源连清、森林生态连清和社会公共数据等多源数据耦合,利用分布式测算方法,研究森林生态系统质量、生态服务功能以及生态产品价值化实现路径,为国家森林生态系统质量和稳定性提升提供科学决策依据,为“绿水青山”向“金山银山”的转化提供实践性强、推广性高的具体范式(王兵等,2020)。

4.1.2 生态站网络的时代需求 我国国家尺度和省域尺度上的生态系统定位观测网络已迈入了稳步发展的新阶段,而处在生态文明建设被高度重视、信息技术高速发展、“互联网+”成为国家发展战略、生态站实时监测和累积数据量大的新时期,对生态系统定位观测网络的建设与发展提出了新要求,即:将生态站与物联网、云计算、大数据处理技术以及大数据平台与后台管理系统等信息技术相结合,建设“互联网+生态站”,以期推动生态系统定位观测由仪器设备采集并长期存储数据的 2.0 时代向“互联网+生态站”的实时数据传递云存储的 3.0 时代转换,进而实现生态站的信息化以及生态站之间的互联互通,数据共享。除此之外,多源遥感技术在实现景观、区域甚至全球尺度上的森林生态研究具有明显优势,已广泛用于森林物候(刘帆等,2018)、病虫害(王蕾等,2008)、火情监测(杨伟等,2018)以及资源动态变化等方面。基于遥感技术的森林生态参数反演研究,大大提高了森林监测的效率,但同时面临着遥感数据产品分辨率低的挑战,无法满足林分尺度相关研究的需求。因此,未来应将生态站长期定位观测数据与多源遥感监测数据相结合,充分发挥二者的监测优势,构建高精度的森林生态功能遥感监测模型,进行森林水源涵养、固碳释氧、净化大气环境和保育土壤等方面的研究,促进森林生态系统高质量发展,提升森林生态系统碳中和能力,助力实现我国“碳达峰”和“碳中和”目标。

4.1.3 网络规划的局限性 基于 GIS 平台,将典型抽样思想和空间分析技术相结合,用于 FON-FEIS 的布局中,解决了生态站建设自下而上,先站后网,无统一规划的局面。然而,需要特别说明的是,该网络规划也存在一定的局限性,例如:在数据获取方

面,云南省气候数据与植被类型数据具有时间差异性;在数据精度方面,《中国植被》(张新时,2007)中经济与农作物未明确区分,存在交叉混合现象(郭慧等,2015)。以上两方面的因素可能会使得FON-FEIS 规划布局结果出现微小的偏差。此外,在生态站自动化实时监测、数据智能化管理以及挖掘应用方面,FON-FEIS 还存在着很大的提升空间,在未来应充分利用传感器、物联网以及基于人工智能的大数据挖掘技术,提升生态站观测系统和数据管理的智能化水平,加强生态站长时间序列时空数据的利用效率,实现生态站从数据采集、传输、管理、共享到应用的综合集成。

4.2 结论

基于GIS规划的云南省FON-FEIS将云南省划分成22个森林生态区,共布局31个森林生态站,其中重点站6个、基本站11个和监测站14个,占比分别为19.35%、35.48%和45.16%。FON-FEIS在森林、重点生态功能区、生物多样性保护优先区层面上的监测精度分别为94.29%、94.76%和87.99%,且25个森林生态站布局与云南省生态功能区相匹配,可以有效监测并保护处于重点生态功能区 and 生物多样性保护优先区的森林生态系统,表明云南省FON-FEIS布局的科学性与合理性。该网络可以补充CFERN网络,实现云南省森林生态系统要素的连续观测与清查,为云南省森林生态系统研究、森林生态服务功能和生态效益评估,价值化绿水青山提供数据支持,进而为重大生态工程提供辅助决策依据,同时为其他省份和地区的FON-FEIS提供一定的参考价值 and 借鉴意义。

参考文献

蔡佳亮,殷贺,黄艺. 2010. 生态功能区划理论研究进展. 生态学报, **30**(11): 3018-3027.

曹润,王邵军,陈闽昆,等. 2019. 西双版纳热带森林不同恢复阶段土壤微生物生物量碳的变化. 生态环境学报, **28**(10): 1982-1990.

冯源,田宇,朱建华,等. 2020. 森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估. 生态学报, **40**(14): 5044-5054.

甘先华,黄钰辉,陶玉柱,等. 2020. 广东省林业生态连清体系网络布局与监测实践. 北京: 中国林业出版社.

郭慧. 2014. 森林生态系统长期定位观测台站布局体系研究(博士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.

郭慧,王兵,牛香. 2015. 基于GIS的湖北省森林生态系统定位观测研究网络规划. 生态学报, **35**(20): 6829-6837.

国家林业局. 2017. GB/T35377—2017 森林生态系统长期定

位观测指标体系. 北京: 中国标准出版社.

韩春,陈宁,孙杉. 2019. 森林生态系统水文调节功能及机制研究进展. 生态学杂志, **38**(7): 2191-2199.

韩玉洁,李琦,王兵,等. 2018. 上海市森林生态连清与生态系统服务研究. 北京: 中国林业出版社.

何亚群,左蔚然,张书敏,等. 2008. 基于地质统计学的煤田煤质插值方法比较. 煤炭学报, **33**(5): 514-517.

李杨. 2010. 基于环境卫星数据的水稻面积空间抽样研究(硕士学位论文). 南京: 南京林业大学.

刘帆,王传宽,王兴昌. 2018. 近地遥感在森林冠层物候动态监测中的应用. 应用生态学报, **29**(6): 1768-1778.

乔玉娜,尹光彩,罗艳,等. 2009. 鼎湖山森林演替序列水文过程中总有机碳(TOC)变化规律及其对土壤碳平衡的贡献(英文). 生态环境学报, **18**(6): 2300-2307.

孙拖焕,梁守伦,樊兰英,等. 2019. 山西省森林生态连清与生态系统服务功能研究. 北京: 中国林业出版社.

王兵,牛香,宋庆丰. 2020. 中国森林生态系统服务评估及其价值化实现路径设计. 环境保护, **48**(14): 28-36.

王兵,任晓旭,胡文. 2011. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学, **47**(2): 145-153.

王磊,梁艺凡,杨军钱,等. 2020. 亚热带主要造林树种土壤氮保留及相关功能的微生物特征. 林业科学, **56**(8): 27-37.

王蕾,骆有庆,张晓丽,等. 2008. 遥感技术在森林病虫害监测中的应用研究进展. 世界林业研究, **21**(5): 37-43.

王泳腾,黄治昊,王俊,等. 2021. 燕山山脉黄檗种群结构与动态特征. 生态学报, **41**(7): 2826-2834.

吴昊,肖楠楠,林婷婷. 2020. 秦岭松栎林功能多样性与物种多样性和环境异质性的耦合关系. 生态环境学报, **29**(6): 1090-1100.

吴红宝,水宏伟,胡国铮,等. 2019. 海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响. 生态环境学报, **28**(6): 1071-1079.

吴文,李月辉,胡远满. 2018. 不同营林措施对林下层多样性和群落结构的影响. 生态环境学报, **27**(7): 1369-1376.

杨萍,白永飞,宋长春,等. 2020. 野外站科研样地建设的思考、探索与展望. 中国科学院院刊, **35**(1): 125-135.

杨伟,姜晓丽. 2018. 森林火灾火烧迹地遥感信息提取及应用. 林业科学, **54**(5): 135-142.

张新时. 2007. 中国植被地理格局与植被区划中华人民共和国植被图集1:100万说明书. 北京: 地质出版社: 603-727.

赵俊芳,曹云,马建勇,等. 2018. 基于遥感和FORCCHN的中国森林生态系统NPP及生态服务功能评估. 生态环境学报, **27**(9): 1585-1592.

赵士洞,张永民. 2006. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. 地球科学进展, (9): 895-902.

赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 2004. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, **19**(4): 480-491.

- 郑 度. 2008. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆.
- 中华人民共和国国务院. 2010. 全国主体功能区规划. http://www.gov.cn/zwgc/2011-06/08/content_1879180.htm.
- 中华人民共和国环境保护部. 2010. 中国生物多样性保护战略与行动计划(2011—2030年). https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201009/t20100921_194841.htm.
- 中共中央办公厅、国务院办公厅. 2021. 关于建立健全生态产品价值实现机制的意见. http://www.gov.cn/zhengce/2021-04/26/content_5602763.htm.
- Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253–260.
- Eliáš P, Mariničová P. 2017. Ecological functions of vegetation as potentials of ecosystem services (floodplain alder forest in the Trábeč microregion). *Journal of Forest Science*, **63**: 126–135.
- Hobbie JE, Carpenter SR, Grimm NB, et al. 2003. The US long term ecological research program. *Bioscience*, **53**: 21–32.
- Lindenmayer DB, Likens GE. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation*, **143**: 1317–1328.
- Miller JD, Adamson JK, Hirst D. 2001. Trends in stream water quality in environmental change network upland catchments: The first 5 years. *Science of the Total Environment*, **265**: 27–38.
- Niu X, Wang B, Wei WJ. 2013. Chinese forest ecosystem research network: A platform for observing and studying sustainable forestry. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **11**: 1008–1016.
- Strayer D, Glitzenstein JS, Jones CG, et al. 1986. Long-term ecological studies: An illustrated account of their design, operation, and importance to ecology. *Occasional Publication of the Institute of Ecosystem Studies*, **5**: 51–55.
- Vaughan H, Brydges T, Fenech A, et al. 2001. Monitoring long-term ecological changes through the ecological monitoring and assessment network: Science-based and policy relevant. *Environmental Monitoring and Assessment*, **67**: 3–28.
- Wang B, Niu X, Wei WJ. 2020. National forest ecosystem inventory system of China: Methodology and applications. *Forests*, **11**: 732.
-
- 作者简介 郭珂,女,1994年生,博士研究生,研究方向为物联网与生态站监测,发表论文5篇。E-mail: 1062054469@qq.com
- 责任编辑 张敏
-