

# 网格尺度下外来入侵植物对高黎贡山生态系统服务影响的空间分析

肖俞<sup>1,2</sup>, 胡金明<sup>2\*</sup>, 段禾祥<sup>1</sup>, 吴学灿<sup>1</sup>, 王珺<sup>1</sup>, 姜志诚<sup>1</sup>

<sup>1</sup>云南省生态环境科学研究院, 中国昆明高原湖泊国际研究中心, 云南昆明 650034;

<sup>2</sup>云南大学入侵生物学研究中心, 西南跨境生态安全教育部重点实验室, 云南昆明 650500

**摘要:**【目的】高黎贡山生物多样性资源丰富, 蕴藏着极高的生态系统服务价值, 是中国重要的西南生态安全屏障。在气候变化和人类活动等影响下, 高黎贡山正面临越来越多的外来植物入侵。明确外来入侵植物分布特征与生态系统服务重要区的空间对应关系, 能够为高黎贡山外来入侵植物防控及生态安全屏障建设提供科学支撑。【方法】利用当量因子法, 在 3 km×3 km 网格单元尺度下评估高黎贡山生态系统服务价值并进行重要性分级分区; 以文献资料分析和实地调查相结合分析高黎贡山区域外来入侵植物的空间分布格局; 利用 Arcgis 10.2 软件分析空间对应关系。【结果】高黎贡山生态系统服务重要性分为 5 级, 单位面积价值量最高的生态系统类型为水系、阔叶林、针叶林、灌木林和灌草丛。外来入侵植物为 59 种, 入侵等级为 I ~ V 级的物种分别有 12、17、8、11 和 11 种。除 I 级重要区外, 其他区域均分布有外来入侵植物, 其中 3 级和 4 级重要区 (主要为灌木林地和耕地) 分布的外来入侵植物的种类和数量最多。【结论】外来植物入侵威胁高黎贡山生态系统服务供给, 亟需开展外来入侵植物系统调查评估以识别高等级入侵植物实施外来入侵植物差别化管控; 陆生外来入侵植物应该成为高黎贡山外来入侵植物研究的重点; 人工灌木林地和耕地作为高黎贡山外来入侵植物集聚区应该重点关注开展外来入侵植物防控。



开放科学标识码  
(OSID 码)

**关键词:** 高黎贡山; 生态系统服务价值; 外来入侵植物; 空间关系

## Spatial analysis of invasive alien plants impact on ecosystem service value in Gaoligong Mountains, southwest China at the grid scale

XIAO Yu<sup>1,2</sup>, HU Jinming<sup>2\*</sup>, DUAN Hexiang<sup>1</sup>, WU Xuecan<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, JIANG Zhicheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Academy of Ecological and Environmental Sciences, Kunming International Research Center for Plateau Lakes, China, Kunming, Yunnan 650034, China; <sup>2</sup>Centre for Invasion Biology, Ministration of Education Key Laboratory for

Transboundary Ecoscurity of Southwest China, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract:** 【Aim】The Gaoligong Mountains serving as the vital ecological security barrier in southwest China are rich in biodiversity and hold high ecosystem service value. The impacts of climate change and human activities have led to serious invasion of alien plants in the Gaoligong Mountains. Clarifying the spacial correspondence between the distribution characteristics of alien invasive plants and important areas of ecosystem services could make contribute to the prevention and control of alien invasive plants and the construction of Gaoligong Mountains ecological security barrier. 【Method】This study valuate ecosystem services value with equivalent factor method, and the importance classification and zoning are carried out at the scale of 3 km grid unit. The spatial distribution pattern of alien invasive plants in Gaoligong Mountains were analyzed by combining literature analysis and field investigation. Arcgis 10.2 software is used to analyse spatial correspondence between ecosystem service zoning and the distribution of alien invasive plants. 【Result】Gaoligong Mountains were divided into five levels according to ecosystem services assessment, and water, broad-leaved forest, coniferous forest, shrub forest and shrub grassland are highest in value per unit area. There are 59 species of alien invasive plants in Gaoligong Mountains, and the numbers of species assessed as grade I - V are 12, 17, 8, 11 and 11. Excepting for the

收稿日期 (Received): 2022-05-19 接受日期 (Accepted): 2022-08-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC05052062); 国家科技部专项 (2019QZKK0502)

作者简介: 肖俞, 女, 博士。研究方向: 外来入侵植物风险评估及生态安全维护。E-mail: xiaoyu@mail.ynu.edu.cn

\* 通信作者 (Author for correspondence), 胡金明, E-mail: hujm@ynu.edu.cn

first level important area, all other areas are distributed with alien invasive plants, with the third and fourth level important areas (mainly shrub forest and farmland) having the most species of alien invasive plants. 【Conclusion】 Alien invasive plants are posing threats to supply of ecosystem services, and it is urgent to conduct a systematic investigation and evaluation of alien invasive plants to identify high-level invasive plants so as to implement differentiated control of alien invasive plants. The terrestrial alien invasive plants should be the focus of the study of alien invasive plants in Gaoligong Mountains; artificial shrub land and cultivated land, as the gathering area of invasive plants in Gaoligong Mountain, should focus on the prevention and control of alien invasive plants..

**Key words:** Gaoligong Mountains; ecosystem service value; alien invasive plant; spacial relationship

生态系统服务 (ecosystem services) 是人类直接或间接从生态系统的结构、功能和过程中获得的各种产品与惠益, 与人类福祉密切相关, 是人类生存与发展的基础 (Costanza *et al.*, 1997)。生态系统服务的持续供给已经被联合国列入可持续发展目标 (Wood *et al.*, 2018)。我国将保护和维持生态系统功能作为建设美丽中国的目标 (万军等, 2021) 并写进了相关的政策法规。在官方发布的国家公园建设的相关文件中也明确提出国家公园的建设要着眼于提升生态系统服务功能。生物入侵是全球生物多样性损失和生态系统服务变化的重要驱动因素之一 (Shrestha & Shrestha, 2019)。外来入侵植物入侵生态系统时, 与本地植物争夺资源, 带来物种灭绝的风险, 造成生物多样性损失, 同时外来入侵植物通过引入新的功能并充当“生态系统工程师”, 改变被入侵群落的系统发育和功能多样性, 改变生态系统的生产力、养分循环和水文循环, 严重威胁当地的生态系统服务和社会经济构成 (石青等, 2017; Blackburn *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2017; Marta *et al.*, 2021; Pyšek *et al.*, 2020)。此外, 在气候变化和人为干扰下, 外来植物扩散入侵的气候屏障和地理屏障被消除, 其已经渗透到了分散山脉、不适宜生长的气候区和严格保护的天然保护地。目前, 我国 69 个国家级自然保护区已经遭到了外来入侵植物的入侵 (生态环境部, 2020), 山地生态系统和天然保护地正面临巨大的生物入侵威胁 (Raia & Singh, 2020; Wood *et al.*, 2018)。

高黎贡山地处中国西南边境 (东经 97°30′ ~ 99°30′、北纬 24°40′ ~ 28°30′), 地跨中缅两国, 境外部分主要包括缅甸北部的克钦邦; 境内部分主要包括云南省隆阳区、龙陵县、腾冲市、泸水市、福贡县和贡山县 6 个县/市/区, 以及西藏自治区察隅县 (李恒等, 2021)。高黎贡山海拔 800~4000 m, 巨大的海拔高差和特殊的地形, 形成了亚热带到寒温带逐渐过渡的立体气候特征, 植被类型相应地形成了

河谷稀树灌木草丛-季风常绿阔叶林-半湿润常绿阔叶林-中山湿性常绿阔叶林-山顶苔藓矮林-苍山冷杉林的山地垂直植被类型 (李恒等, 2021)。此外, 受高空西风环流, 印度洋西南季风和太平洋季风环流的影响, 高黎贡山东西两坡形成了分异明显的水热条件, 在东坡产生了显著的“焚风效应” (刘洋, 2008; 邢雯雯, 2019)。土地利用类型以林地为主, 将近占土地面积的 75% 以上, 其余草地占 6% 左右, 耕地占 16% 左右, 水域和湿地面积占 0.3% 左右, 其余裸地、人工用地和冰川面积非常小。

高黎贡山位于全球生物多样性热点地区中, 是我国 35 个生物多样性保护优先区之一, 连接着东喜马拉雅地区、横断山地区、印-缅地区 3 个全球生物多样性的热点地区, 被誉为“世界物种基因库”“人与生物圈保护区”和“世界级的天然保护地”, 是中国生物多样性的关键地区, 是我国的生物多样性宝库。同时, 高黎贡山保存了完好的原始森林植被, 在涵养水源、保持水土、净化空气、固碳释氧、调节气候、维持生物多样性方面都发挥着重要作用 (林子雁等, 2020), 是我国西南地区的绿色生态屏障。此外, 高黎贡山也是实施“一带一路”中缅印跨境保护的重要地段, 是中缅印边境国家生物生态安全的重要区域。由于地处边境地区, 贸易和人类活动增加了外来植物入侵风险, 同时, 气候变化加快了外来植物的扩散风险, 高黎贡山生物和生态安全正在面临生物入侵的威胁 (高正文等, 2020; 杨珺和李恒, 2017)。本研究开展外来入侵植物空间分布特征调查、核算生态系统服务价值并进行分区, 在公里网格尺度下分析外来入侵植物对高黎贡山生态系统服务影响的空间分布特征。在此基础上识别高黎贡山应该重点关注的外来入侵植物物种和重点关注区域, 进一步摸清高黎贡山外来入侵植物入侵的本底情况, 以为高黎贡山制定精准的外来入侵植物分区分类防控措施提供科学支撑, 持续维护高黎贡山西南生态安全屏障功能。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

土地利用数据来自 Global Land Cover 数据库,分辨率为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ , 地类中林地包括常绿阔叶林/针叶林、常绿/落叶阔叶灌丛、灌木园地 5 类; 草地包括温性/高寒草原、温性/高寒草甸、草丛和稀疏草地共 6 类; 耕地包括水田和旱地; 湿地包括水库和河流; 人工表面涵盖建设用地、交通用地、采矿场 3 类; 其他土地利用类型里面包括了裸岩、裸土、沙漠和冰川/永久积雪。

外来入侵植物分布数据来自全球生物多样性数库 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF) (<http://www.gbif.org/>) 和现场实地调查数据。

### 1.2 数据处理

1.2.1 生态系统服务价值评估与分区 本研究采用当量因子法进行生态系统服务价值计算并基于网格单元进行生态系统服务重要性分区。当量因子采用谢高地等 (2008, 2015) 修订的价值当量因子计算每一类生态系统的总价值量, 1 个当量因子价值等于评估年度单位面积 ( $\text{hm}^2$ ) 农田食物生产的生态系统服务价值 (收益-投入)。

生态系统服务包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务。为避免分区结果过于破碎化, 并考虑分区结果便于管理服务, 本研究将评估尺度划分为  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  的网格进行生态系统服务重要性分区。首先, 基于高黎贡山研究区土地利用类型图层将 21 种土地利用类型合并划分为阔叶林、针叶林、灌木林、草原、草甸、灌草丛、水田、旱地、水系、荒漠、裸地和冰川积雪 12 个二级生态系统类型。其次, 对合并划分的 12 类二级生态系统进行单位面积价值量的赋值, 换算得到每个栅格单元的生态系统服务价值当量因子值, 即每  $900\text{ m}^2$  的生态系统的当量因子值。再次, 为避免生态系统服务价值分区过于破碎, 利用 Arcgis 10.2 将土地利用图层划分为  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  网格区域, 利用 Arcgis 10.2 空间分析中的分区统计工具对  $3\text{ km}$  网格内的生态系统服务价值当量进行平均值的计算, 计算出  $3\text{ km}$  网格的价值当量因子的平均值, 结果显示的是  $3\text{ km}$  网格中各栅格单元当量因子的平均值。最后, 将计算好的当量因子平均值图层利用自然断点法进行生态系统服务重要性分级, 将生态系统服务重要性分为 1~5 级并进行分区显示。

1.2.2 外来入侵植物空间数据获取 首先, 建立高黎贡山研究区外来入侵植物清单。梳理《云南省外来入侵物种名录 (2019 版)》记录位于高黎贡山下辖行政区 (保山市隆阳区、龙陵县、腾冲市和怒江州泸水市、福贡县和贡山县) 内的外来入侵植物、《高黎贡山植物资源与区系地理》记录的高黎贡山的外来入侵植物、《中国外来入侵植物名录》相关研究记录分布于云南且位于高黎贡山相关区域 (如怒江流域) 的外来入侵植物, 建立高黎贡山外来入侵植物名录 (以下简称《名录》)。其次, 按照《名录》, 基于 R 语言从全球生物多样性数库 (Global Biodiversity Information Facility GBIF) (<http://www.gbif.org/>) 下载研究区范围内的点位信息。再次, 对下载后的数据进行筛选处理, 提取 “country” “family” “genus” “species” “lat” “lon” 等信息, 形成 “.csv 文件”。

1.2.3 实地调查数据获取与处理 根据文献及数据库资料, 高黎贡山陆域外来入侵植物的主要生境为耕地、园地, 路边, 少部分生长于灌木林地、疏林地中 (国怀亮和柳江, 2014; 芮振宇等, 2020; 杨珺和李恒, 2017)。因此, 本研究的样线布设以人类活动干扰区域 (道路、桥梁、居民点、采砂采矿点、耕地) 为中心, 开展外来入侵植物调查。样线的布设综合考虑海拔高程和植物生长型。其中, 海拔高程按照植被类型划分为 7 个带: 海拔  $<1300\text{ m}$  (云南松林、河谷稀树灌木草丛);  $1300\text{ m} \leq$  海拔  $<1600\text{ m}$  (季风常绿阔叶林);  $1600\text{ m} \leq$  海拔  $<2200\text{ m}$  (半湿润常绿阔叶林);  $2200\text{ m} \leq$  海拔  $<2700\text{ m}$  (中山湿性常绿阔叶林);  $2700\text{ m} \leq$  海拔  $<3200\text{ m}$  (山顶苔藓矮林、云南铁杉林、寒温性竹林、苍山冷杉林);  $3200\text{ m} \leq$  海拔  $<3600\text{ m}$  (寒温性灌丛、草甸); 海拔  $>3600\text{ m}$  (岩石裸露地) (李恒等, 2021)。植物生长型分为草本、灌木和乔木 (许凯扬等, 2004; Pyšek *et al.*, 2017)。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务重要性分级及分区

根据谢高地等 (2008, 2015) 修正的当量因子计算出的高黎贡山研究区栅格单元 ( $900\text{ m}^2$ ) 当量因子范围是  $0.099 \sim 11.305$  (表 1)。其中, 价值量最高, 生态系统服务最为重要的生态系统为水系, 当量因子价值为 11.304, 主要原因是水系的调节服务能力远远高于其他类型的生态系统。其次是自然生态用地, 包括阔叶林、针叶林、灌木林、草甸和灌

草丛,且 5 种生态系统类型价值当量因子价值相差不大。荒漠、裸地由于没有植被覆盖,几乎丧失了供给、调节、支持和文化服务,因此也成为生态系统服务价值最少的生态系统类型。

利用 Arcgis 10.2 分区统计工具计算的 3 km×3 km 网格的当量因子平均值的范围为 0.09~8.59,其范围介于栅格单元的价值当量因子值(0.018~11.305)之间。利用自然断点法将研究区生态系统服务重要性划分为 5 级,1~5 级的生态系统服务价值当量因子值分别为 3.46~8.59、1.83~3.46、1.43~1.83、1.06~1.43 和 0.09~1.06。1~5 级区的面积分别占研究区面积的比例为 0.7%、18.0%、42.3%、22.6%、16.4%(图 1)。1 级区主要位于河流区域,2 级区的生态系统类型主要是阔叶林,3 级区的生态系统类型主要是针叶林和灌木林,4 级区的生态系统类型主要是灌木林和旱地,5 级区的生态系统类型主要是水田、裸地、裸岩和冰川。1 级区面积较少,因为整个研究区的中水域和湿地的面积仅占研究区的 0.3%左右。2 级、3 级和 4 级区的面积占比较大,这与研究区中林地面积占研究区面积比例大的结果相一致。5 级区的面积占比与研究区中水田、裸地、人工用地和冰川等其他类型生态系统在研究区面积占比也是一致的。

## 2.2 外来入侵植物现状及空间分布特征

通过获取数据库数据和开展实地调查,本研究共获得高黎贡山外来入侵植物有效数据为 326 条。326 条数据中包括外来入侵植物 59 种,分属于 23 个科 53 个属,其中以菊科最多,为 11 种,占 18.6%;

苋科和茄科次之,均为 7 种,占比 12%。根据《中国外来入侵植物名录》(马金双和李慧茹,2018),59 种外来入侵植物中,I~V 级入侵植物分别为 12、17、8、11 和 11 种。除 1 级生态系统服务重要区外,其他各级生态系统服务重要区均有外来入侵植物分布(图 2)。其中,2 级区分布有外来入侵植物 18 种 47 个,包括 I 级外来入侵植物垂序商陆 *Phytolacca americana* L.、藿香蓟 *Ageratum conyzoides* L.、圆叶牵牛 *Ipomoea purpurea* Lam 和土荆芥 *Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin et Clemants 4 种。3、4 和 5 级区的外来入侵植物的种类和数量分别为 36 种(174 个)、31 种(70 个)、16 种(35 个)。

各级生态系统服务重要区内的外来入侵植物名录见表 2 所示。生态系统服务 3 级、4 级重要区中外来入侵植物的种类和数量最多,一方面主要是因为 3 级、4 级重要区的面积范围大。但更为重要的原因是 3 级、4 级生态系统服务重要区内的生态系统类型主要为灌木林地、灌草丛和耕地,而根据实地调查,灌木林地大部分为人工种植的杨梅树、芒果树、咖啡等灌木。人工灌木林和耕地以及草地中由于人为干扰促进了外来入侵植物的繁殖体传入,同时,这些区域由于资源的波动降低了本地群落对外来植物的抵抗力进而促进更多的外来入侵植物定殖(黄凯,2020; Davis *et al.*, 2020; Raia & Singh, 2020),这与赵彩云等(2019)、杨小艳(2016)、Park *et al.*(2021)的研究认为草地、耕地和荒地生态系统比乔灌木林地更容易遭到外来入侵植物的入侵的结论一致。

表 1 高黎贡山生态系统服务价值当量  
Table 1 The equivalents of ecosystem service value in Gaoligong Mountains

生态系统类别 Ecosystem type	供给服务价值 当量 Equivalent value of supply service	调节服务价值 当量 Equivalent value of regulation service	支持服务价值 当量 Equivalent value of support service	文化服务价值 当量 Equivalent value of cultural service	综合服务价值 当量 Equivalent value of integrated service	单个像元价值 当量 Equivalent value of a single pixel
阔叶林 Broadleaf forest	1.29	15.34	5.26	1.06	22.95	2.066
针叶林 Coniferous forest	1.01	11.60	4.10	0.82	17.53	1.579
灌木林 Shrub forest	0.84	10.27	3.42	0.69	15.22	1.370
草原 Steppe	0.32	3.27	1.23	0.25	5.07	0.456
草甸 Meadow	0.73	7.37	2.77	0.56	11.43	1.029
灌草丛 Shrubland	1.25	12.72	4.76	0.96	19.69	1.772
水田 Paddy field	-1.18	4.57	0.41	0.09	3.89	0.350
旱地 Dry farmland	1.27	1.40	3.41	0.06	4.01	0.361
水系 Water system	9.32	110.85	6.41	1.89	125.61	11.305
荒漠 Desert	0.06	0.73	0.26	0.05	1.10	0.099
裸地 Bare ground	0	0.15	3.26	0.01	0.20	0.018
冰川 Permanent ice	2.16	8.01	6.26	0.09	10.27	0.924

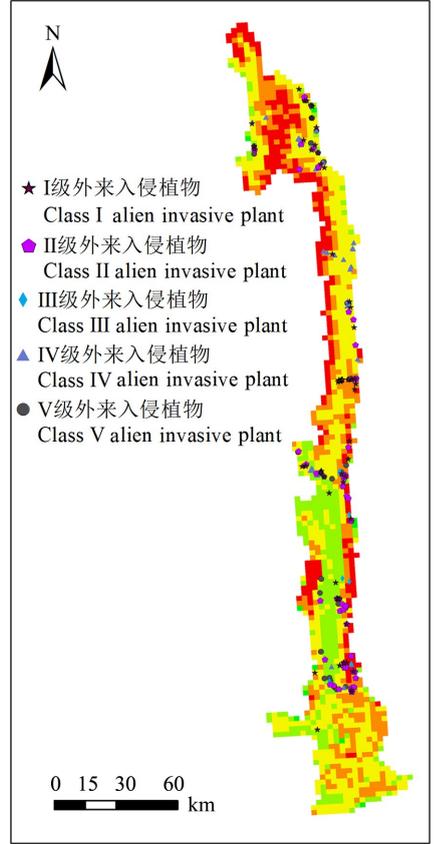
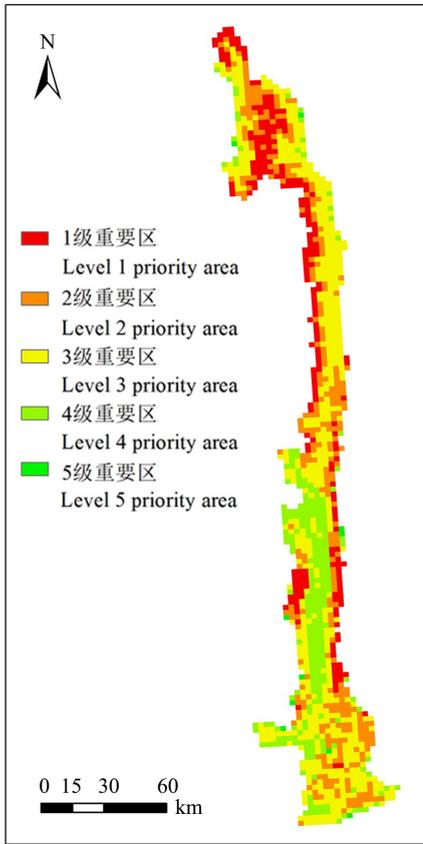


图 1 高黎贡山生态系统服务重要性分区

图 2 高黎贡山外来入侵植物与生态系统服务重要区空间位置关系

Fig.1 The distribution of different levels of ecosystem services in Gaoligong Mountains

Fig.2 Spatial position relationship between the alien invasive plant and important ecosystem service area in Gaoligong Mountains

表 2 高黎贡山不同生态系统重要区中外来入侵植物

Table 2 Alien invasive plant in different ecosystem service level area in Gaoligong Mountains

分区 Zoning	种类 /种 Species	数量 /个 Number of species	I 级外来入侵 植物 Class I alien invasive plant	II 级外来入侵 植物 Class II alien invasive plant	III 级外来入侵 植物 Class III alien invasive plant	IV 级外来入侵 植物 Class IV alien invasive plant	V 级外来入侵 植物 Class V alien invasive plant
1 级区 Level 1	0	0	-	-	-	-	-
2 级区 Level 2	18	47	垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i> 、藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> 、圆叶牵牛 <i>Pharbitis purpurea</i> 、土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i> 、喀西茄 <i>Solanum aculeatissimum</i> 、蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	假酸浆 <i>Nicandra physalodes</i> 、莧萝 <i>Ipomoea quamoclit</i>	弯曲碎米荠 <i>Cardamine flexuosa</i> 、豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i> 、阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i> poir、土人參 <i>Talinum paniculatum</i> 、金灯藤 <i>Cuscuta japonica</i>	牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、粉花月见草 <i>Oenothera rosea</i> 、鸡蛋果 <i>Passiflora edulis</i> 、荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i>
3 级区 Level 3	36	174	紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> 、藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> 、马缨丹 <i>Lantana camara</i> 、落葵薯 <i>Anredera cordifolia</i> 、刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> 、白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> 、垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i> 、苏门白酒草 <i>Erigeron sumatrensis</i> 、小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> 、土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	粉花月见草 <i>Oenothera rosea</i> 、牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i> 、喀西茄 <i>Solanum khasianum</i> 、银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> 、皱果苋 <i>Amaranthus viridis</i> 、野胡萝卜 <i>Daucus carota</i> 、蓖麻 <i>Ricinus communis</i> 、假烟叶树 <i>Solanum erianthum</i> 、赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i> 、金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i>	北美车前 <i>Plantago virginica</i> 、少花龙葵 <i>Solanum americanum</i> 、婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i> 、假酸浆 <i>Nicandra physalodes</i>	弯曲碎米荠 <i>Cardamine flexuosa</i> 、豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i> 、阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i> 、土人參 <i>Talinum paniculatum</i>	龙舌兰 <i>Agave sisalana</i> 、鸡蛋果、棕叶狗尾草 <i>Setaria palmifolia</i> 、牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、灯笼果 <i>Physalis peruviana</i> 、落葵 <i>Basella alba</i> 、刺芹 <i>Eryngium foetidum</i> 、荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i>

续表 2

分区 Zoning	物种 种类 Species	物种 数量 Number of species	I 级外来入侵 植物 Class I alien invasive plant	II 级外来入侵 植物 Class II alien invasive plant	III 级外来入侵 植物 Class III alien invasive plant	IV 级外来入侵 植物 Class IV alien invasive plant	V 级外来入侵 植物 Class V alien invasive plant
4 级区 Level 4	31	70	土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> 、马缨丹 <i>Lantana camara</i> 、刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> 、小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> 、藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> 、紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> 、落葵薯 <i>Anredera cordifolia</i>	含羞草 <i>Mimosa pudica</i> 、水茄 <i>Solanum torvum</i> 、假烟叶树 <i>Solanum elaeagnifolium</i> 、羽芒菊 <i>Tridax procumbens</i> 、赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i> 、蓖麻 <i>Ricinus communis</i> 、凹头苋 <i>Amaranthus blitum</i> 、飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i> 、银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> 、北美独行菜 <i>Lepidium virginicum</i> 、曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	通奶草 <i>Euphorbia hypericifolia</i> 、盖裂果 <i>Mitracarpus hirtus</i> 、北美车前 <i>Plantago virginica</i> 、少花龙葵 <i>Solanum americanum</i>	青葙 <i>Celosia argentea</i> 、长柔毛野豌豆 <i>Vicia villosa</i> 、阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i> 、苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	棕叶狗尾草 <i>Setaria palmifolia</i> 、白茅 <i>Imperata cylindrica</i> 、麻风树 <i>Jatropha curcas</i> 、牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 、粉花月见草 <i>Oenothera rosea</i>
5 级区 Level 5	16	35	土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> 、马缨丹 <i>Lantana camara</i> 、刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> 、小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> 、紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>	银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> 、飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i> 、牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i> 、水茄 <i>Solanum torvum</i> 、赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i>	少花龙葵 <i>Solanum americanum</i> 、盖裂果 <i>Mitracarpus hirtus</i> 、刺花莲子草 <i>Alternanthera pungens</i>	菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i> 、青葙 <i>Celosia argentea</i> 、豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i>	荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i> 、白茅 <i>Imperata cylindrica</i>

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

(1) 生态系统服务评价可分为价值量和物质量的评估。以当量因子法为代表的价值量评估数据需求少、评估全面、方法相对简单、易操作,不需要复杂的模型计算和问卷调查,可作为生态系统服务价值评估的快速核算工具(包旭等,2021; 谢高地等,2008; Costanza *et al.*, 1997)。而物质量的评估通常是基于生态系统过程而构建模型,利用 InVEST、ARIES、SolVES、MIMES、TESSA 等模型深入了解某一类别生态系统服务产生机理,利于可持续性研究生态系统(袁周炎妍和万荣荣,2019)。本研究旨在通过计算每一类生态系统类型的生态系统服务总价值,从而进行外来入侵植物对生态系统服务影响的区域分析。利用当量因子法可快速、完整地每一类生态系统服务进行评价、计算。但由于研究区的空间异质性,利用当量因子可能存在空间差异,后续可进行生态系统服务物质量的计算,利用物质量的计算结果进行当量因子的本地化修正,以进一步提高生态系统服务评估、重要性分级的准确度。

(2) 本研究利用 30 m 分辨率的土地利用类型图层换算单个栅格单元的生态系统服务价值当量因子值,再利用分区统计工具计算 3 km×3 km 网格生态系统服务价值当量因子平均值,而非直接将 30 m 分

辨率的土地利用类型图层重采样直接得到分辨率为 3 km 的生态系统类型计算其当量因子值。一方面 30 m 分辨率生态系统当量因子的精度保证了反映研究区生态系统的空间异质性;另一方面也弥补了直接利用栅格单元当量因子反映研究区生态系统服务空间异质性过于破碎不便于研究分析、制定区域外来入侵植物防控管理措施的问题。

(3) 外来入侵植物分布数据的获取数量直接关系到研究结果的应用价值。本研究利用 GBIF 数据库获取数据、收集研究区相关研究结果数据,并开展实地调查以尽可能多地获取数据。相比于利用文献(标本)数据开展研究分析,本研究在之前的研究基础上往前推进了一小步,提高了物种分布数据获取的精度、研究结果的准确性和科学性。但高黎贡山研究区面积广阔,要更加精确地进行高黎贡山外来入侵植物对生态系统服务影响研究,科学合理分区划定外来入侵植物风险防控区并制定防控措施,大量细致的样线样方调查工作是必不可少的。

(4) 外来入侵植物因生物、生态和生物地理特征的不同,同一外来入侵物种在不同区域的入侵态势可能出现不一致(严靖等,2017)。对比实地调查的高黎贡山研究区外来入侵植物入侵态势与目前外来入侵植物入侵等级的定级情况,本研究发现仅被定级为 V 级的龙舌兰在研究区南段呈现疯狂扩散生长的态势,且已入侵到天然林地中;而被定级

为 I 级的落葵薯和被定为 II 级的蓖麻、赛葵等高等级物种在高黎贡山研究区却分布很少, 未出现恶性或严重入侵的态势。为提高研究的应用价值, 制定更加科学合理的外来入侵植物防控措施, 仅是利用已有的外来入侵植物入侵等级结果为研究区的外来入侵植物进行入侵等级评定是不够合理的。因此, 下一步的研究重点应该加强对研究区的外来入侵植物进行系统调查, 根据实地调查结果利用同一套标准指标进行研究区外来入侵植物的入侵等级评定, 为后续的一系列相关研究提供基础可信的数据。

### 3.2 结论

(1) 高黎贡山研究区栅格单元生态系统服务价值当量因子值为 0.099~11.305, 生态系统服务价值最高的生态系统类型为水系、阔叶林、针叶林、灌木林和灌草丛。3 km×3 km 网格单元生态系统服务价值当量因子平均值范围在 0.09~8.59。5 个级别重要区中 3 级重要区面积最大, 4 级次之, 2 级和 5 级面积相当。研究区生态系统服务价值量最高的生态系统类型是针叶林、灌木林和灌草丛, 阔叶林和旱地次之, 价值量最小的生态系统类型是水田、裸地和裸岩。

(2) 高黎贡山区域外来入侵植物物种初步调查种类为 59 种, 分属于 23 科 53 属, 菊科最多、苋科和茄科次之。59 种外来入侵植物中, I~V 级外来入侵植物都有, 且数量相当。说明高黎贡山区域外来入侵植物种类多, 入侵态势复杂, 急需开展全面系统调查并对研究区外来入侵植物进行同一标准的本地化入侵等级评定, 识别高等级入侵物种。5 个级别的生态系统服务重要区中, 1 级区没有调查到入侵植物分布, 3 级、4 级区中的外来入侵物种种类和数量最多, 说明水生外来入侵植物在高黎贡山入侵不明显, 陆域外来入侵植物研究应该成为研究区外来入侵植物防控的重点。4 级区面积仅为 3 级区的 50% 左右, 但入侵植物种类和 3 级区相当, 说明人工灌木林地和耕地应该成为研究区外来入侵植物调查和管控重点区域。

### 参考文献

包姐, 李杰, 刘锋, 胡金明, 2021. 1995—2015 年缅甸土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 41(17): 6960-6969.

高正文, 孙航, 蒋学龙, 2020. 外来入侵物种名录. 昆明: 云南科技出版社.

国怀亮, 柳江, 2014. 路域生态系统中外来入侵植物分布格局及其影响因素研究综述. 云南大学学报(自然科学版), 36(S1): 148-153.

黄凯, 2020. 物种和群落水平上外来入侵植物与共生本地植物叶功能性状和养分循环的差异及环境的影响. 博士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.

林子雁, 肖懿, 饶恩明, 雪史威, 张平, 2020. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系. 应用生态学报, 31(3): 978-983.

李恒, 李嵘, 马文章, 张良, 王欣宇, 2021. 植物资源与区系地理. 武汉: 湖北科学技术出版社.

刘洋, 2008. 纵向岭谷区山地气候时空变化及其生态效应. 博士学位论文. 西双版纳: 中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园).

马金双, 李慧茹, 2018. 中国外来入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.

芮振宇, 钟耀华, 刘姚, 张震, 2020. 安徽省外来植物入侵状况分析. 生物安全学报, 29(1): 59-68.

石青, 陈雪, 罗雪晶, 陈凤新, 任晓鸿, 2017. 京津冀外来入侵植物的种类调查与分析. 生物安全学报, 26(3): 215-223.

生态环境部, 2020. 2019 中国生态环境状况公报. (2020-06-02)[2022-05-09]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>.

万军, 王金南, 李新, 秦昌波, 强焯, 苏洁琼, 2021. 2035 年美丽中国建设的目标及实施路径研究. 中国环境管理(5): 29-36.

邢雯雯, 2019. 高黎贡山复杂地形下局地环流的数值模拟研究. 硕士学位论文. 昆明: 云南大学.

谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操, 2008. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 23(5): 911-919.

谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞, 2015. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 37(9): 1740-1746.

许凯扬, 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 2004. 植物群落的生物多样性及其可入侵性关系的实验研究. 植物生态学报, 28(3): 385-391.

杨珺, 李恒, 2017. 高黎贡山地区外来入侵种子植物. 西部林业科学, 46(S2): 93-104.

杨小艳, 2016. 重庆缙云山国家级自然保护区入侵植物风险评估及防治对策. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.

袁周炎妍, 万荣荣, 2019. 生态系统服务评估方法研究进展. 生态科学, 38(5): 210-219.

严靖, 闫小玲, 王樟华, 李慧茹, 马金双, 2017. 安徽省外来入侵植物的分布格局及其等级划分. 植物科学学报,

- 35(5): 679–690.
- 赵彩云, 赵相健, 柳晓燕, 李俊生, 2019. 云南省六个国家级自然保护区外来入侵草本植物与本地植物的关系. *植物保护学报*, 46(1): 122–129.
- BLACKBURN T M, BELLARD C, RICCIARDI A, 2019. Alien versus native species as driver of recent extinction. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17: 203–207.
- COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, FARBER S, GRASSO M, HANNON B, LIMBURG K, NAEEM S, O'NEILL R V, PARUELO J, RASKIN R G, SUTTON P, VAN DEN BELT M, 1997. The value of world's ecosystem services and nature capital. *Nature*, 387: 253–260.
- DAVIS M A, GRIME J P, THOMPSON K, 2020. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology*, 88: 528–534.
- LEE J, RAI P K, KWON S, 2017. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water. *Environmental Pollution*, 227: 252–262.
- MARTA C, STUART W L, MARNEY E I, 2021. Invasion drives plant diversity loss through competition and ecosystem modification. *Journal of Ecology*, 109(10): 3587–3601.
- PYŠEK P, HULME P E, SIMBERLOFF D, BACHER S, BLACKBURN T M, CARLTON J T, DAWSON W, ESSL F, FOXCROFT L C, GENOVESI P, JESCHKE J M, KÜHN I, LIEBHOLD A M, MANDRAK N E, MEYERSON L A, PAUCHARD A, PERGL J, ROY H E, SEEBENS H, KLEUNEN M V, VILÀ M, WINGFIELD M J, RICHARDSON D M, 2020. Scientists warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95: 1511–1534.
- PYŠEK P, PERGL J, ESSL F, LENZNER B, DAWSON W, KREFT H, WEIGELT P, WINTER M, KARTESZ J, NISHINO M, ANTONOVA L A, BARCELONA J F, CABEZAS F J, CARDENAS D, CARDENAS-TORO J, CASTANO N, CHACON E, CHATELAIN C, DULLINGER S, EBEL A L, FIGUEIREDO E, FUENTES N, GENOVESI P, GROOM Q J, HENDERSON L, INDERJIT, KUPRIYANOV A, MASCIADRI S, MAUREL N, MEERMAN J, MOROZOVA O, MOSER D, NICKRENT D, NOWAK P M, PAGAD S, PATZELT A, PELSER P B, SEEBENS H, SHU W S, THOMAS J, VELAYOS M, WEBER E, WIERINGA J J, BAPTISTE M P, VAN KLEUNEN M, 2017. Naturalized alien flora of the world. *Preslia*, 89(3): 203–274.
- PARK S, LEE H, CHOI D, KIM Y, 2021. Spatially varying relationships between alien plant distributions and environmental factors in South Korea. *Plants*, 10(7): 1377.
- RAIA P K, SINGH J S, 2020. Invasive alien plant species: their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111: 106020.
- SHRESTHA U B, SHRESTHA B B, 2019. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal. *Diversity and Distributions*, 25: 1599–1612.
- WOOD S L R, JONES S K, JOHNSON J A, BRAUMAN K A, CHAPLIN-KRAMER R, FREMIER A, GIRVETZ E, GORDON L J, KAPPEL C V, MANDLE L, MULLIGAN M, O'FARRELL P, SMITH W K, WILLEMEN L, ZHANG W, DECLERCK F A, 2018. Distilling the role of ecosystem services in the sustainable development goal. *Ecosystem Services*, 29: 70–82.

(责任编辑:郭莹)