

深圳大鹏半岛薇甘菊的空间发生规律

唐尚杰^{1,2}, 杨 龙², 刘美洁², 黄钰辉³, 甘先华³, 尹光彩¹, 孙中宇^{2*}

¹广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; ²广东省遥感与地理信息系统应用重点实验室/广东省地理空间信息技术与应用公共实验室/广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510070; ³广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院森林生态研究所, 广东 广州 510520

摘要:【目的】研究薇甘菊的入侵与地形、人为干扰间的关系, 量化不同干扰因素对薇甘菊发生的影响, 进一步揭示薇甘菊的发生规律, 为薇甘菊的系统防治与管控提供技术支持。【方法】使用无人机遥感系统所获取的高分辨率航拍片作为数据源, 通过目视解译方法确定薇甘菊的发生区域后结合 3S 技术手段, 对深圳大鹏半岛 210000 m² 研究区内的薇甘菊发生状况与地形因子及人为干扰度间的关系进行系统分析。

【结果】研究区内薇甘菊在低海拔区和阳坡分布居多, 86.80% 的薇甘菊入侵发生在人类轻中度干扰区, 20°~40° 坡度位置是薇甘菊的重点发生区。研究网格单元内薇甘菊的发生面积与坡度、高程显著负相关 ($P < 0.01$), 与坡向相关性较差。【结论】在人为干扰较小的自然条件下, 制约薇甘菊扩散发生的主要因子是入侵地的群落结构, 而在人为干扰较为严重的地区, 薇甘菊入侵的发生与人类活动消失后产生的空白生态位密切相关。

关键词: 薇甘菊; 空间分布; 地形因子; 人为干扰指数; 扩散规律; 无人机



开放科学标识码
(OSID 码)

Spatial pattern of the occurrence of *Mikania micrantha* in Dapeng Peninsula, Shenzhen

TANG Shangjie^{1,2}, YANG Long², LIU Meijie², HUANG Yuhui³, GAN Xianhua³, YIN Guangcai¹, SUN Zhongyu^{2*}

¹School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China;

²Key Lab of Guangdong for Utilization of Remote Sensing and Geographical Information System/Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application/Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510070, China; ³Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Forest Ecology Research Institute, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China

Abstract: 【Aim】 This study aimed to explore the relationship between *Mikania micrantha* invasion, terrain factors, and human disturbance to quantify the influence of different disturbance factors on the occurrence of *M. micrantha*. This was done to further reveal the pattern of occurrence of *M. micrantha* and to provide technical support for the systematic prevention and control of *M. micrantha*.

【Method】 Using high-resolution aerial photos obtained by using a UAV remote sensing system as the data source, the occurrence area of *M. micrantha* was determined by visual interpretation. The relationship between the occurrence of *M. micrantha* in the 210000 m² study area of the Dapeng Peninsula in Shenzhen and topographic factors as well as human disturbance was systematically analyzed by combining 3S technology. 【Result】 The results showed that 86.80% of the *M. micrantha* invasions in the study area occurred in areas with low-to-moderate human disturbance. *M. micrantha* is mainly distributed in low-altitude areas and sunny slopes, and 20°–40° is the incline with the highest occurrence of *M. micrantha*. The occurrence area of *M. micrantha* in the grid unit of the study area was negatively correlated with the slope and altitude ($P < 0.01$) but was not significantly related to the aspect. 【Conclusion】 Under natural conditions with low human disturbance, the main factor limiting the spread of *M. micrantha* is the community structure of the invasion site, whereas, in areas with more severe human disturbance, the occurrence of *M. micrantha* invasion is closely related to the empty ecological niche created after the disappearance of human activities.

收稿日期 (Received): 2022-10-14 接受日期 (Accepted): 2022-12-08

基金项目: 广东省科学院平台培育专项(2020GDASYL-0104002); 广东省林业科技创新项目(2022KJCX003)

作者简介: 唐尚杰, 男, 硕士研究生。研究方向: 无人机遥感生态应用与生物入侵防治。E-mail: adatangj@163.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 孙中宇, E-mail: sunzhyu@gdas.ac.cn

Key words: *Mikania micrantha*; spatial distribution; terrain factor; hemeroby index; pattern of spread; UAV

薇甘菊 *Mikania micrantha* H.B.K. 是菊科 Compositae 假泽兰属 *Mikania* 草质藤本植物,原产热带美洲,20世纪80年代经由香港传入深圳(王伯荪等,2003),因其具有极强的繁殖力,并且缺乏天敌,90年代至今在珠江三角洲地区泛滥成灾(练惠通等,2014),并对本地生态系统造成严重威胁(周先叶等,2005),仅广东省每年因薇甘菊危害造成的经济损失就达数亿元(钟晓青等,2004)。

为遏制薇甘菊在我国的蔓延态势,国内学者针对薇甘菊的入侵性,如生物学特性(蒋露等,2016;孔国辉等,2000;宋莉英等,2009)、对环境的生理生态响应(魏巍等,2017)、化感作用(邵华等,2003)等方面开展了大量的工作,同时在化学、生物和生态防治方面也取得了一系列进展(韩诗畴等,2001;李云琴等,2019;刘晓燕,2012)。但目前薇甘菊的防治工作依然困难重重,存在治理后反复暴发、难以根除等痛点。薇甘菊的防治是一项系统工程,不仅需要从基因、生理、个体和种群等小微尺度上对其遗传、生物学特征及种群动态等开展深入研究,也需要从群落、局域到区域尺度上入手,对其种间关系、分布特征和扩散规律等开展广泛研究,只有微观和宏观相结合的系统防治措施,才可能取得较为理想的防治效果(Zhang *et al.*, 2004)。

国内学者在小微尺度上围绕薇甘菊入侵开展的工作较为系统,但在局域到区域尺度上的研究案例则相对缺乏(莫宝盈等,2021;吴卉晶等,2010)。“区域”(regional)是具有一定面积、相对较均匀的地貌和气候的陆地表面;“局域”(local)即局部区域,一般是指一个景观类型,如一个有限的流域、海岸草地系统、森林复合体等(方精云等,2009)。上述2个尺度上研究案例的缺乏,很大程度上受限于研究手段。以往局域或区域尺度上薇甘菊的入侵研究和防治只能依靠地面调查,受到可达性的限制,调查工作存在一些盲点,导致获取的分布数据存在较大误差,难以进行空间分析。尽管一些高分辨率的卫星遥感数据,如Pleiades-1和WorldView-2获取的遥感数据(陈利等,2014;柳帅等,2014)可用于识别盛花期的薇甘菊,但受云层和空间分辨率的制约,数据精度仍难以满足入侵机理分析的需求。近年来,无人机遥感技术的发展为局域至区域尺度上开展薇甘菊的入侵生

态学研究创造了新的契机(孙中宇等,2019; Qiao *et al.*, 2020)。厘米级的空间分辨率和定位误差,可以保证薇甘菊的物种识别精度及空间分布信息的准确性,基于无人机遥感数据提取的物种分布面积、土地利用形式和地形等因子可用于系统分析薇甘菊的空间发生规律(王瑞瑞等,2021),为局域到区域尺度的薇甘菊入侵和扩散机制研究提供了基础。

深圳大鹏半岛位于深圳市东南部,三面环海,是珠江三角洲地区重要的陆地与海洋生态系统结合区域,半岛位于北回归线以南,亚热带北缘与南亚热带过渡地带,属南亚热带海洋性季风气候,夏季高温多雨,冬季干旱,年平均温度22.3℃,年平均降水量2000mm,相对湿度80%。随着经济发展和快速城市化,大鹏半岛生境逐渐破碎化,原始常绿季雨林和常绿阔叶林被破坏殆尽,天然次生林保存相对完好(张荣京等,2005)。研究区位于深圳市大鹏半岛市级自然保护区鹅公村附近(22°29'5" N, 114°29'46" E),研究区高程106.2~212.8m,总面积210447.31m²。本研究以深圳市大鹏半岛210000m²的薇甘菊发生区为研究对象,基于无人机遥感手段获取高精度的薇甘菊空间分布数据及土地利用和地理要素信息,系统探讨大鹏半岛薇甘菊的空间发生规律及其关键影响因子,研究结果可为深圳大鹏半岛的薇甘菊预警和防治提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

无人机数据获取时间为2020年11月5日,天气晴朗无云,飞行设备选用大疆御2行业进阶版无人机,搭载4800万像素可见光相机和差分GPS模块。在DJI GS Pro地面站上规划无人机作业航线,航高设为214m,影像的航向和旁向重叠度均设为85%。通过9条平行航线共获得265张正射影像,采用Agisoft Photoscan professional v1.4.0(Agisoft LLC,俄罗斯)进行拼接处理:将无人机获取的影像导入软件,按照对齐照片、建立密集点云、生成网格、纹理、生成数字高程模型、生成正射影像的流程对数据进行处理,经过控制点(表1)校正后采用WGS84坐标系导出研究区正射影像(digital orthophoto map, DOM)和数字高程模型(digital elevation model, DEM)(图1)。

表 1 控制点经纬度坐标

Table 1 Latitude and longitude coordinates of control points

编号 Number	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	编号 Number	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)
1	114.495083	22.486010	6	114.494659	22.486238
2	114.495206	22.484058	7	114.496978	22.484662
3	114.494226	22.484311	8	114.495769	22.485895
4	114.497255	22.483111	9	114.497440	22.486015
5	114.495965	22.484777			

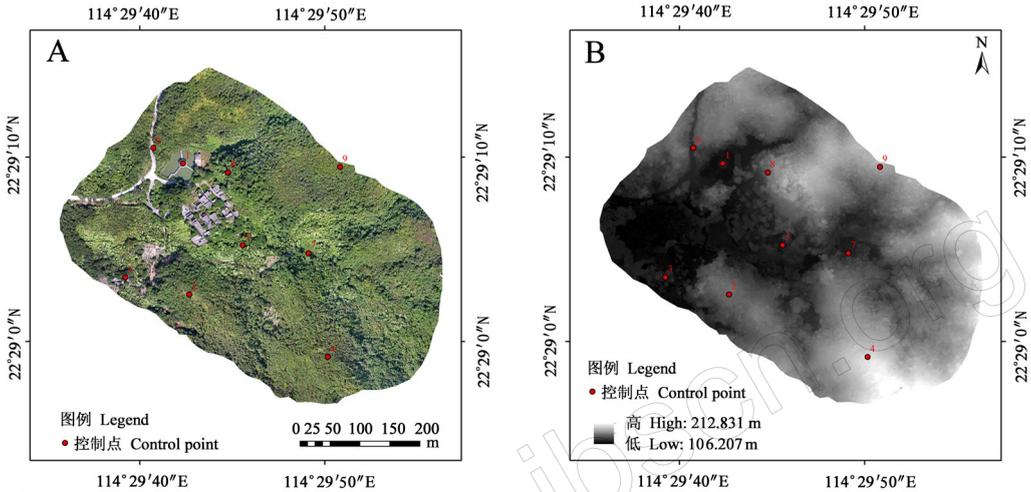


图 1 研究区正射影像 (A) 与数字高程影像 (B)

Fig.1 Digital orthophoto map (A) and digital elevation model (B) of the study area

1.2 薇甘菊识别与发生面积提取

盛花期薇甘菊在可见光波段内的反射率显著高于其他植被(柳帅等,2014),其纹理在无人机遥感影像中与周边的植物亦有明显差别(孙中宇等,2019;王瑞瑞等,2021)。本研究根据盛花期薇甘菊影像的形态和纹理特征并结合野外实地调查,采用目视解译的方法手动勾取研究区内的薇甘菊发生范围,随后在 ArcGIS 中使用创建渔网功能,将研究区分解为连续发生的 20 m×20 m 网格,共计 586 个,将每个网格作为一个研究单元,计算单元内薇甘菊发生面积。

1.3 地形因子空间关联分析

地形特征是影响薇甘菊入侵分布的重要因子(邱罗等,2010;吴卉晶等,2009),研究选取坡度、坡向、高程等作为地形特征,对薇甘菊的空间发生特征与地形因子间的关系进行研究。根据无人机航片在 Agisoft Photoscan professional v1.4.0 软件中生成数字高程模型,利用 ArcGIS 10.7 软件中空间分析工具生成相应的坡度、坡向,然后将研究区高程、坡度、坡向按照 20 m×20 m 进行分割,计算每个网格内的平均高程、平均坡度和平均坡向。

根据研究区的数字高程模型将研究区分为低海拔区(106<DEM≤126 m)、中低海拔区(126<

DEM≤146 m)、中海拔区(146<DEM≤166 m)、中高海拔区(166<DEM≤186 m)和高海拔区(186<DEM≤212 m)等 5 个区;通过自然断点法(jenks)将研究区坡度划分为 0°<slope 1≤24°、24°<slope 2≤44°、44°<slope 3≤65°、65°<slope 4≤90°等 4 个坡度等级,对薇甘菊在不同坡度间的发生状况有大致了解后,以 10°为一个梯度对坡度再次细分,确定对薇甘菊生长影响最大的坡度区间。坡向根据其坡面朝向划分为阴坡(0°<aspect≤45°)、半阴坡(45°<aspect≤135°)、阳坡(135°<aspect≤225°)、半阳坡(225°<aspect≤315°)、阳坡(315°<aspect≤360°)等 5 个坡向。然后将 20 m×20 m 网格内的薇甘菊发生面积经对数转换后,通过 IBM SPSS 26 软件与平均高程(man DEM)、平均坡度(mean slope)、平均坡向(mean aspect)做相关与回归分析,确定在局域尺度下影响薇甘菊发生的地形因子。上述数据处理在 Arcgis 10.7、SPSS 26 与 Excel 2014 中完成。

1.4 人为干扰空间关联分析

为量化研究薇甘菊发生与人为干扰间的内在关联,本研究通过引入生态干扰度指标分析薇甘菊的发生面积与人为干扰度(hemeroby)之间的关系。在国内,生态干扰度这一概念由陈爱莲等(2010)引

人用于河口湿地人为干扰度动态监测,后被大量应用于人为干扰度与生态系统的动态关联研究中(冯志贤等,2017;郝建锋等,2014;刘吉平等,2016;孙永光等,2012;张跃等,2012)。本研究根据无人机正射影像与野外调查资料对研究区地表覆盖类型进行目视解译,结合研究区实际情况,确定了4个人为干扰度等级,并制定相应的人为干扰度等级表(表2)。如硬化地表、道路、房屋等完全受人类活动影响,几乎不可能自然演替恢复为自然状态,人类干扰等级为完全干扰(H_4);废弃果园、风水林等在经过一段时间自然演替后,可以逐渐恢复其原有的自然地貌,但在此之前,其受人类活动干扰程度很强,且需要依靠人类管理来维持生境,干扰等级为重度干扰(H_3);农村土路、荒地、建筑物旁乔灌林等,农村土路因为其本身面积较小且未进行固化处理,在废弃后能较快恢复自然状态,而荒地、建筑物旁乔灌林等虽受人类活动影响,但因其本身群落结构未被人类活动完全破坏,通过自然演替能够恢复原有的地貌结构,因此对这一类地物划分为中度人

类干扰(H_2);乔木林、灌木林、低矮灌丛与天然草地等区域受人类活动影响相对较小,人为干扰程度低,对此类地物划分为轻度人类干扰(H_1)。

对研究区人为干扰类型进行划分后,与 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 网格进行相交,计算每个网格单元内的人为干扰值,计算公式为:

$$HI = \sum_i^n f_i \times H_i \quad (1)$$

式中,HI 为统计单元人为干扰指数; n 为统计单元内地表覆盖的斑块数; f_i 为当前斑块 i 的面积与统计单元面积的比值; H_i 为当前斑块类型的人为干扰度相对值。

确定每个网格单元内薇甘菊面积与人为干扰值后,按照轻度干扰($0 < HI \leq 1$)、中度干扰($1 < HI \leq 2$)、重度干扰($2 < HI \leq 3$)、完全干扰($3 < HI \leq 4$)等4个等级对薇甘菊的发生面积进行统计,确定不同人为干扰下薇甘菊的发生面积。上述数据处理均在 Arcgis 10.7 与 Excel 2014 中完成。

表2 地表覆盖分类人为干扰度赋值
Table 2 Assignment of land cover classes to degrees of hemeroby

人为干扰度 Hemeroby	地表覆盖类型 Land cover type	相对值 Relative value
H_1 (轻度干扰) H_1 (slight interference)	乔木林、乔灌混合林、天然草地、灌木林、低矮灌丛 Arbor forest, arbor shrub mixed forest, natural grassland, shrub forest, low scrub	1
H_2 (中度干扰) H_2 (moderate interference)	农村土路、荒地、房屋周围乔灌林 Rural road, wasteland, tree and shrub around the house	2
H_3 (重度干扰) H_3 (severe interference)	废弃果园、风水林、其他人类活动 Discarded orchard, Fengshui Forest, other human activities	3
H_4 (完全干扰) H_4 (complete interference)	道路、鱼塘、房屋、硬化地表 Road, fishpond, house, pavement	4

2 结果

2.1 薇甘菊空间发生情况

通过目视解译及地面调查对花期薇甘菊的发生情况进行识别和确认(图2),基于研究网格(图3)计算研究区内薇甘菊的总发生面积为 10644.09 m^2 ,占研究区总面积的 5.06% 。

薇甘菊在不同高程、海拔、坡向、坡度的发生情况如图4所示。薇甘菊在低海拔区发生面积为 1927.22 m^2 ,占总发生面积的 18.11% ;在中低海拔区发生面积为 8210.44 m^2 ,占总发生面积的 77.13% ;在中海拔区发生面积为 504.80 m^2 ,占总发生面积的 5.12% ;在中高海拔区发生面积为 1.63 m^2 ,占总发生面积的 0.0002% ;在高海拔区未发生。由薇甘菊在研究区不同海拔下的发生状况可看出,

薇甘菊在中低海拔地区大面积生长、暴发,而随着高程的增加,薇甘菊的发生面积迅速降低。

不同坡向下,薇甘菊发生面积及占比为:阴坡 1792.49 m^2 , 16.99% ;半阴坡 2353.93 m^2 , 22.31% ;阳坡 3636.18 m^2 , 34.45% ;半阳坡 2767.83 m^2 , 26.23% 。在研究区内,薇甘菊虽在各坡向下均有发生,但在阳坡下的发生面积较阴坡高 17.46% ,阳坡与半阳坡的发生面积较阴坡与半阴坡的发生面积高 21.38% 。

不同坡度下薇甘菊的发生面积也有显著差异(表3)。在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 坡度间,薇甘菊的分布面积随着坡度上升而增加,在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 坡度间分布面积最大;在 $40^\circ \sim 90^\circ$ 坡度间,薇甘菊的发生面积随着坡度的增加而减少,在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 坡度减少最为剧烈。

整体来看,研究区内的薇甘菊集中发生在 $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的坡度范围内,其发生面积达到 8742.05 m^2 , 占总发生面积的 81.89% ,其中 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 坡度范围内的薇

甘菊发生面积为 4271.05 m^2 , 占总发生面积的 40.01% 。

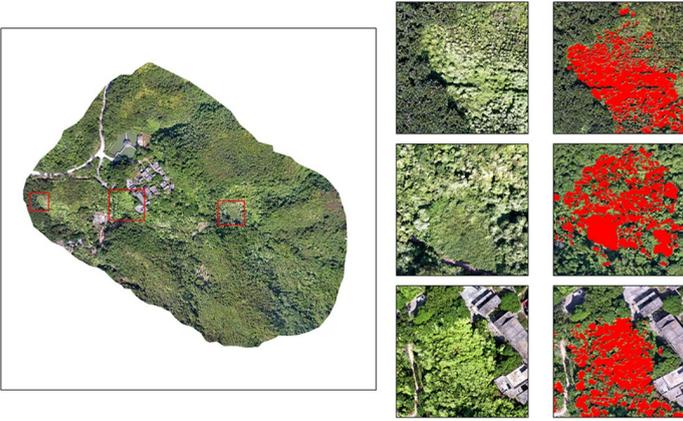


图 2 研究区薇甘菊解译识别过程

Fig.2 Interpretation and recognition process of *M. micrantha* in the study area

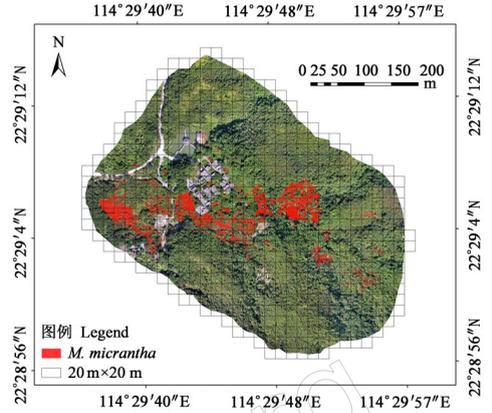


图 3 研究区薇甘菊发生图

Fig.3 Occurrence map of *M. micrantha*

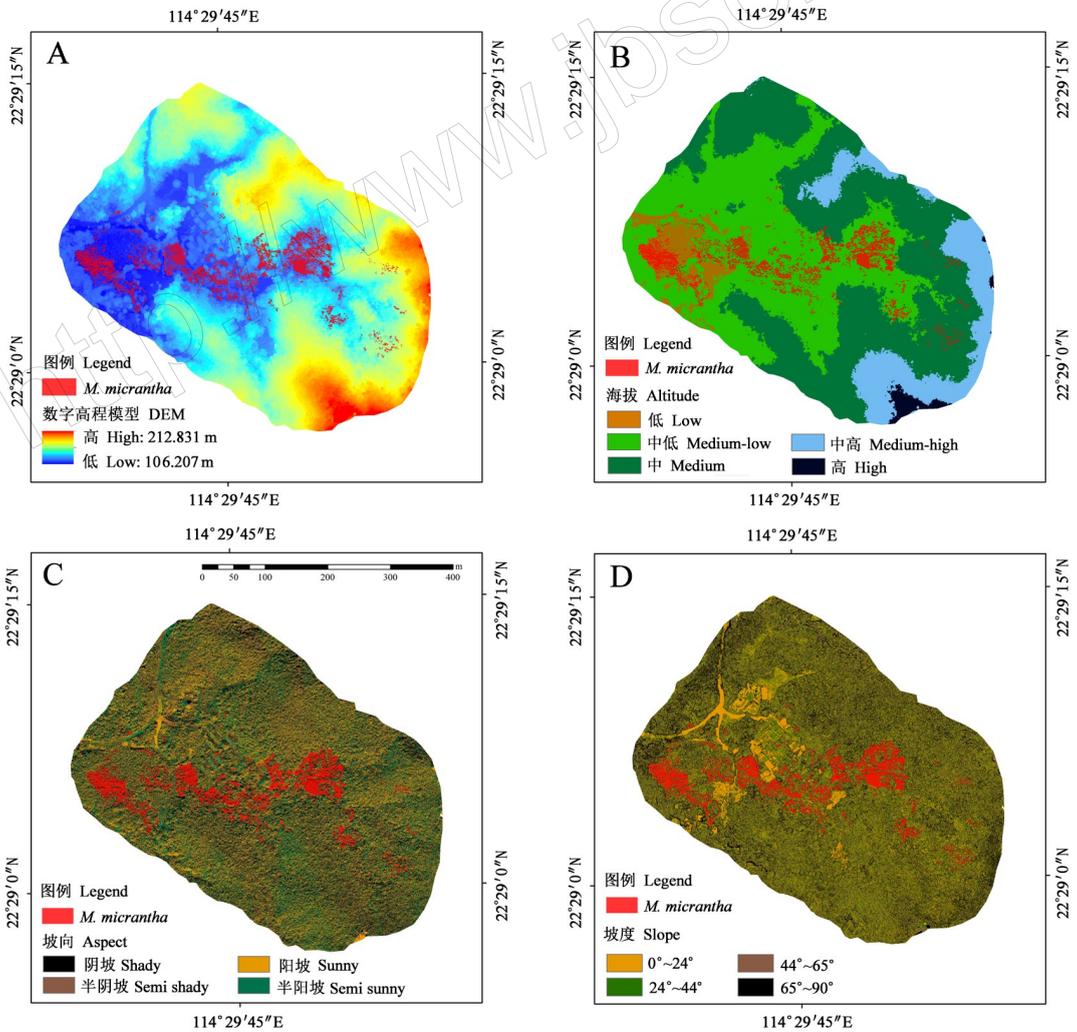


图 4 研究区薇甘菊发生与数字高程模型 (A)、海拔 (B)、坡向 (C)、坡度 (D) 关系图

Fig.4 The relationship between the occurrence of *M. micrantha* and digital elevation model (A), altitude (B), aspect (C) and slope (D) in the study area

表3 各坡度下薇甘菊发生面积

Table 3 Occurrence area of *M. micrantha* at each slope

坡度 Slope/(°)	发生面积 Area/m ²	面积占比 Proportion of area/%	坡度 Slope/(°)	发生面积 Area/m ²	面积占比 Proportion of area/%
0~10	698.10	6.54	50~60	1144.76	10.72
10~20	1596.23	14.95	60~70	660.00	6.18
20~30	2148.28	20.12	70~80	351.72	3.30
30~40	2122.77	19.89	80~90	222.92	2.10
40~50	1730.01	16.21			

2.2 薇甘菊空间发生与地形因子联系

20 m×20 m 网格内 Pearson 相关性分析结果(表4)表明,平均高程(MD)、平均坡度(MS)与薇甘菊发生面积间展现出极显著的负相关性($P<0.01$)。

薇甘菊空间发生与地形因子间的关系如图5所示。在平均坡度 35°~40°内,薇甘菊密集发生,且平均坡度与发生面积间呈极显著负相关性($P<0.01$),说明当平均坡度处于 35°~40°时,薇甘菊快速生长繁殖,而随着平均坡度的增加,薇甘菊发生数量减少、危害程度降低;在平均高程 120~145 m 内,薇甘菊密集发生,且平均高程与发生面积间呈极显著负相关($P<0.01$),当平均高程较低时,薇甘菊能迅速生长繁殖,填补空白生态位,而随着平均高程增加,发生面积和数量均迅速减少,危害能力降低;平均坡向虽与发生面积间无显著相关性,但

通过薇甘菊空间发生与平均坡向的线性关系图可看出,薇甘菊在平均坡向处于 150°~200°时的发生数量和面积明显高于其他坡向,说明 150°~200°向阳区域内的薇甘菊生长更为旺盛,光照强度对薇甘菊的发生有明显的促进作用。

表4 20 m×20 m 网格内 Pearson 相关性分析
Table 4 Pearson correlation analysis in 20 m×20 m grid

地形因子 Topographical factor	皮尔逊相关系数 Pearson correlation coefficient	P 值 P value
平均高程(MD)	-0.301 *	<0.01
平均坡度(MS)	-0.350 *	<0.01
平均坡向(MA)	-0.061	0.638

*表示在 $P<0.05$ 水平下显著相关(皮尔逊相关分析)。

* indicates significant correlation at $P<0.05$ level (Pearson correlation analysis).

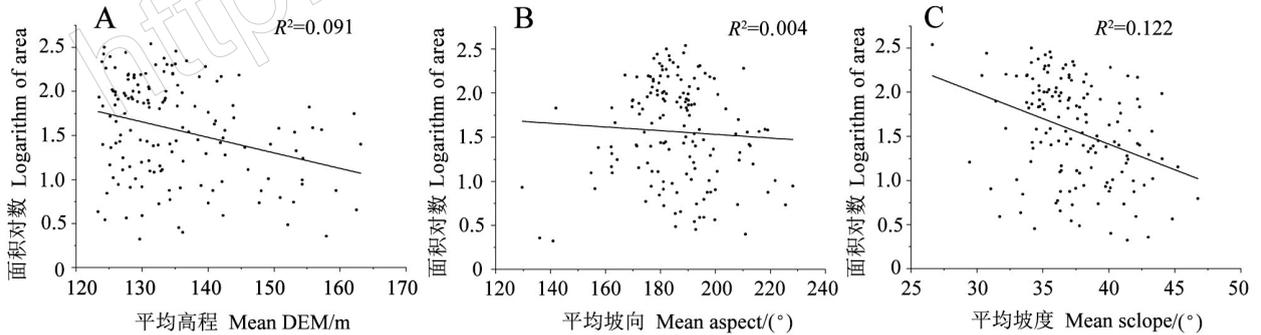


图5 薇甘菊发生面积对数与平均高程(A)、坡向(B)、坡度(C)的线性分布图

Fig.5 Linear distribution diagram of logarithm of occurrence area and mean DEM (A), aspect (B), slope (C) of *M. micrantha*

2.3 不同干扰等级下的薇甘菊发生情况

薇甘菊在不同土地利用下的发生情况见图6,不同人为干扰度下的薇甘菊发生面积见表5。在研究区,薇甘菊主要发生在轻中干扰度地区,发生面积达 9237.40 m²,占研究区薇甘菊总面积的 86.80%。轻度人为干扰下,发生面积为 5645.44 m²,

占总发生面积的 53.07%,主要发生在灌木林、乔灌混合林和低矮灌丛。在受到人类活动完全干扰的地区,如房屋、硬化道路等,薇甘菊无法定植,仅有少量攀附在房屋上或匍匐于道路旁。

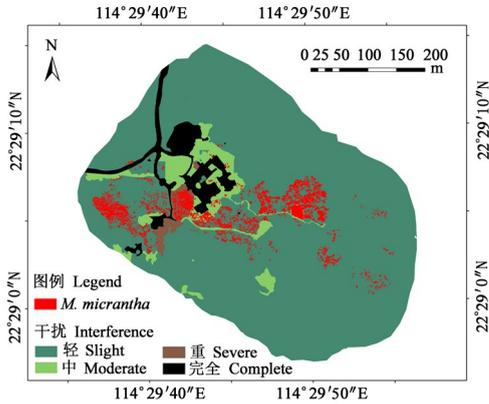


图 6 研究区薇甘菊发生与人类干扰

Fig.6 Occurrence of *M. micrantha* and hemeroby in the study area

表 5 不同干扰度下薇甘菊发生面积

Table 5 Area of *M. micrantha* under different hemeroby

人类干扰度 Hemeroby	薇甘菊覆盖面积 Coverage area of <i>M. micrantha</i> /m ²	占比 Proportion/%
H ₁ (0<HI≤1)	5645.44	53.07
H ₂ (1<HI≤2)	3591.96	33.73
H ₃ (2<HI≤3)	1250.74	11.76
H ₄ (3<HI≤4)	154.67	1.44

3 讨论

3.1 地形因子对薇甘菊发生的影响

薇甘菊入侵的发生位点与地形因子密切相关,但这种相关性因地域的不同而有所差异。如位于深圳宝安区,其坡度和坡向与非入侵区域有显著差异(吴卉晶等,2009);但在广州的发生区域,坡度与坡向对其分布无显著影响(邱罗等,2010)。多数情况下,薇甘菊喜好在水源充足且向阳的地带生长,易在中低海拔区域发生入侵(陈志云等,2021;贺东北等,2016;邱罗等,2010)。本研究区所在地深圳大鹏半岛,位于海陆交界地带,其地理特征与以上研究区域有显著差异。本研究中,薇甘菊在深圳大鹏半岛低海拔与中低海拔区域大量发生,在中海拔区发生面积迅速降低,中高海拔与高海拔区域几乎无发生,总体呈现出随海拔增高而发生面积降低的趋势。大鹏半岛的薇甘菊在不同坡向上均有发生,但阳坡发生面积明显高于阴坡,此区域光照条件仍是制约薇甘菊扩散的重要因子。现有研究表明,坡度与薇甘菊发生之间存在一定关联(吴卉晶等,2009;王瑞瑞等,2021),但坡度与薇甘菊发生面积间的定量关系还有待探究。本研究结果表明,0°~60°坡度间是薇甘菊主要生长坡度范围,在20°~40°的坡度范围分布最多,在0°~40°的坡度间,薇甘菊的发生面积随坡度的增加而增加,并在20°~

40°坡度间达到最大,坡度升至40°后,发生面积随着坡度的增加逐渐减少。在相关性研究中,薇甘菊的发生面积与高程、坡度展现出极显著的负相关性($P<0.01$),说明在局域尺度下,高程和坡度是限制薇甘菊生长的重要环境因子,在海拔高且地势陡峭的地区,薇甘菊很难建群,而海拔低、地势相对平缓的地区更容易受到薇甘菊扩散的危害。薇甘菊的发生面积虽然与坡向没有显著相关性,但是相对于背阳面,向阳面的薇甘菊发生面积要更大。海拔和光照条件是影响薇甘菊扩散发生的重要因子,在局域尺度下,坡度与薇甘菊的分布展现出了更强的关联性。因此,在局域尺度下的薇甘菊防控管理中,应当对中低海拔、光照条件较好且具有一定地势起伏度的区域进行长期监测及重点关注,尽早掌握薇甘菊的生长状况及扩散趋势。

3.2 人为干扰对薇甘菊发生的影响

本研究发现,在人为干扰较小的自然群落下,制约薇甘菊扩散的主要因子是入侵地的群落结构。在轻度人类干扰区域,地表覆盖主要是乔木林、乔灌混合林、天然草地、灌木林、低矮灌丛,薇甘菊发生面积达5645.44 m²,占总发生面积的53.07%。通过进一步解析发现,在群落结构完整、郁闭度高的乔木林、乔灌林中,薇甘菊很难建群,发生面积很小,而在林分结构单一、郁闭度低的灌木林、低矮灌丛中,薇甘菊成片扩散,发生面积大。

在人为干扰较为严重的地区,薇甘菊的发生与人类活动减少后产生的空白生态位息息相关。本研究中,荒地、废弃果园、风水林等受人类中重度干扰的区域,薇甘菊的发生面积达4842.70 m²,占总发生面积的45.49%。在依赖人类生产活动维持的生境中,随着人类管理的缺失或减少,生境中存在的大量空白生态位,导致群落更易受到薇甘菊的入侵(吴卉晶等,2009)。此外,对群落内原本存在的植物而言,人类活动减少后,群落内虽产生了新的空白生态位,但其很难在与薇甘菊的生存竞争中取得优势。这是由于当薇甘菊在适宜生境聚集发生时,其种群存活率增加,通过无性繁殖和种子短途传播即可在短时间内形成一定范围内的大规模扩散(温达志等,2000; Swamy & Ramakrishnan, 1987),薇甘菊释放的化感物质,还会通过雨水淋溶、根系分泌、枯枝叶分解作用于其他植物,抑制它们的生长,为自身的生长创造更好的条件(郑亚萍

等,2021; Ismail & Kumar,2002)。

3.3 地形与人为干扰的交互作用对薇甘菊发生的影响

本研究中,在低海拔区域,人类活动频繁,道路、房屋、经济林密集分布,地表植物主要由废弃果林、灌木林、低矮灌丛等组成,在此区域内薇甘菊成片扩散,发生面积大。中高海拔地区的植物群落组成主要为结构完整、郁闭度高的乔木、乔灌混合林,在此区域内,薇甘菊发生面积小,仅零星生长于林冠之上。在低海拔、有一定地势起伏度、人类活动频繁且林分组成简单、郁闭度低的生境中,薇甘菊迅速生长繁殖并大面积暴发,而在海拔较高、地势起伏大、人类活动稀少且林分复杂、郁闭度高的生境中,薇甘菊很难建群,即使有零星薇甘菊存在,也很难对生境造成危害。

在实际管理工作中,对低海拔有一定地势起伏度的区域,受人类干扰较为严重的群落加以改造与控制,增强其对薇甘菊入侵的抵抗能力,或可成为预防薇甘菊入侵的有效手段。在群落演替初级阶段,群落不稳定且抗干扰能力弱,易受到薇甘菊入侵危害(邵志芳等,2006),而人类活动又进一步加大这种不稳定性。在没有薇甘菊的地区,通过搭配种植不同的乔木、灌木或草本植物来改造林分和群落,可达到抵御薇甘菊侵害的效果(林翠新等,2003);在薇甘菊入侵严重区域,对薇甘菊选择性清除后种植乡土阔叶树种并搭配适生灌草,可有效控制薇甘菊蔓延,降低薇甘菊危害(殷祚云等,2003);种植木桐 *Macaranga tanarius* (L.) Muell. Arg.、幌伞枫 *Heteropanax fragrans* (Roxb.) Seem.、阴香 *Cinnamomum burmannii* (Nees & T.Nees) Blume、海南蒲桃 *Syzygium hainanense* Chang et Miau、枫香 *Liquidambar formosana* Hance、木荷 *Schima superba* Gardn. et Champ.等乔灌木也可降低薇甘菊的危害程度(李明光等,2012;刘志军,2016)。

总体来看,处于低海拔有一定地势起伏度的区域、人类活动频繁且林分组成简单的群落易受到薇甘菊入侵的危害,应将此类区域作为重点防控地带,一方面通过长期、连续观测,及早掌握薇甘菊的发生动态,另一方面亦可考虑将群落改造与控制作为重点受侵害地带管理工作的补充手段。

3.4 不足与展望

本研究虽对薇甘菊的发生与局域尺度下的地

形因子、人为干扰间的关系进行了量化研究,进一步明确了地形因子及人为干扰与薇甘菊发生间的关系,但仍存在不足:首先,研究是基于薇甘菊盛花期的无人机遥感影像开展的,处于盛花期的薇甘菊与其附着植物有明显的形态差异,大片的白色花朵有助于对其进行识别监测(柳帅等,2014),而不同生长期的薇甘菊及其发生与地形、人为干扰间的关系,还需进一步探讨;其次,本研究未对薇甘菊的定居—建群—扩散—暴发过程进行完整的动态监测,局域范围薇甘菊的空间扩散规律仍有待深入研究。应通过长期监测,进一步研究薇甘菊在入侵扩散过程中与地形因子、人为干扰间的内在联系,加深对局域到区域尺度间的薇甘菊扩散规律研究,为薇甘菊在重点区域与生态薄弱地区的精准防控及预警提供可靠依据。

参考文献

- 陈爱莲,朱博勤,陈利顶,吴艳华,孙然好,2010. 双台河口湿地景观及生态干扰度的动态变化. 应用生态学报, 21(5): 1120-1128.
- 陈利,林辉,孙华,2014. 基于WorldView-2影像的外来物种薇甘菊入侵遥感监测. 浙江农林大学学报, 31(2): 185-189.
- 陈志云,马红岩,王玲,李东文,谢德志,莫羨,孔达卿,2021. 广东中山市薇甘菊地理分布及适生区预测. 亚热带植物科学, 50(3): 222-226.
- 方精云,王襄平,唐志尧,2009. 局域和区域过程共同控制着群落的物种多样性:种库假说,生物多样性, 17(6): 605-612.
- 冯志贤,张继贤,侯伟,翟亮,2017. 基于地表覆盖分类的生态环境人为干扰度分析——以北京市为例. 生态学杂志, 36(2): 508-516.
- 韩诗畴,李丽英,彭统序,刘文惠,李开煌,陈巧贤,罗莉芬,邵婉婷,2001. 薇甘菊的天敌调查初报. 昆虫天敌, 23(3): 119-126.
- 郝建锋,王德艺,李艳,姚小兰,张逸博,詹美春,齐锦秋,2014. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响. 生态学报, 34(23): 6930-6942.
- 贺东北,柯善新,周平阳,谢国来,陈振雄,陈申姣,陈碧章,2016. 德宏州薇甘菊分布规律与防控策略研究. 中南林业调查规划, 35(4): 35-41.
- 蒋露,张艳武,郭强,刘莹,李春妹,2016. 我国入侵植物薇甘菊(菊科)的细胞学研究. 热带亚热带植物学报, 24(5): 508-514.
- 孔国辉,吴七根,胡启明,叶万辉,2000. 薇甘菊(*Mikania*

- micrantha* H.B.K.) 的形态、分类与生态资料补记. 热带亚热带植物学报, 8(2): 128-130.
- 李鸣光, 鲁尔贝, 郭强, 咎启杰, 韦萍萍, 蒋露, 徐华林, 钟镇奎, 2012. 入侵种薇甘菊防治措施及策略评估. 生态学报, 32(10): 3240-3251.
- 李云琴, 季梅, 刘凌, 户连荣, 张知晓, 泽桑梓, 2019. 云南省林地薇甘菊防控研究进展. 生物安全学报, 28(1): 1-6.
- 练惠通, 黄泽文, 张波, 黎子理, 招观龙, 黄金雄, 向安强, 2014. 广东农业外来有害生物薇甘菊入侵的历史阶段与特点. 安徽农业科学, 42(20): 6695-6698, 6753.
- 林翠新, 廖庆文, 曾丽梅, 2003. 薇甘菊的研究综述. 广西林业科学, 32(2): 60-65.
- 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 刘雁, 2016. 1955—2010 年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应. 地理科学, 36(6): 879-887.
- 刘晓燕, 曹堃程, 李园, 郭美霞, 王秋霞, 周波, 陈长伟, 徐建, 2012. 几种除草剂对薇甘菊的防控效果. 生物安全学报, 21(3): 216-220.
- 刘志军, 黄少勇, 官东清, 徐加通, 周胜, 李鸣光, 2016. 果园转型生态公益林防控薇甘菊的生态改造. 生物安全学报, 25(2): 133-136.
- 柳帅, 林辉, 孙华, 陈利, 2014. 基于 Pleiades-1 卫星数据薇甘菊信息提取. 中南林业科技大学学报, 34(11): 116-119.
- 莫宝盈, 侯中原, 查钱慧, 张阳锋, 2021. 基于中国知网的“薇甘菊”文献计量分析. 热带林业, 49(2): 73-79, 72.
- 邱罗, 杨志高, 陈伟, 熊启明, 于洋, 2010. 广州薇甘菊潜在空间分布预测分析. 中南林业科技大学学报, 30(5): 128-133.
- 邵志芳, 赵厚本, 邱少松, 杨义标, 彭少麟, 陆宠芳, 陈卓全, 2006. 深圳市主要外来入侵植物调查及治理状况. 生态环境, 15(3): 587-593.
- 宋莉英, 彭长连, 彭少麟, 2009. 华南地区 3 种入侵植物与本地植物叶片建成成本的比较. 生物多样性, 17(4): 378-384.
- 孙永光, 赵冬至, 吴涛, 卫宝泉, 高树刚, 李媛, 曹芳芳, 2012. 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例. 生态学报, 32(12): 3645-3655.
- 孙中字, 荆文龙, 乔曦, 杨龙, 2019. 基于无人机遥感的盛花期薇甘菊爆发点识别与监测. 热带地理, 39(4): 482-491.
- 王伯荪, 廖文波, 咎启杰, 李鸣光, 周先叶, 高三红, 2003. 薇甘菊 *Mikania micrantha* 在中国的传播. 中山大学学报(自然科学版), 42(4): 47-50, 54.
- 王瑞瑞, 李怡燃, 石伟, 段芸杉, 陈兴旺, 2021. 基于 LiDAR 和 DOM 数据的薇甘菊自动识别与分布预测. 农业机械学报, 52(11): 263-270.
- 魏巍, 侯玉平, 彭少麟, 陈鹏东, 梁希平, 张静, 2017. 不同光照强度对入侵植物薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 和飞机草 (*Chromolaena odorata*) 生长及生物量分配的影响. 生态学报, 37(18): 6021-6028.
- 温达志, 叶万辉, 冯惠玲, 蔡楚雄, 2000. 外来入侵杂草薇甘菊及其伴生种基本光合特性的比较. 热带亚热带植物学报, 8(2): 139-146.
- 吴卉晶, 曾辉, 咎启杰, 2010. 薇甘菊入侵扩散机制研究进展与改进思考. 热带亚热带植物学报, 18(1): 101-108.
- 吴卉晶, 咎启杰, 曾辉, 2009. 区域尺度薇甘菊入侵分布的影响因子. 生态学报, 29(10): 5442-5449.
- 殷祚云, 李小川, 何立平, 黄文辉, 周永文, 黎容根, 徐庆华, 张贻安, 罗航, 2003. 薇甘菊生态防除研究初报. 广东林业科技, 19(4): 17-22.
- 张荣京, 张永夏, 严岳鸿, 陈红锋, 邢福武, 2005. 深圳大鹏半岛常绿季雨林和常绿阔叶林群落物种多样性分析. 山地学报, 23(4): 495-501.
- 张跃, 雷开明, 张语克, 肖长林, 杨玉花, 孙鸿鸥, 李淑君, 2012. 植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例. 生态学报, 32(13): 4228-4235.
- 钟晓青, 黄卓, 司寰, 咎启杰, 2004. 深圳内伶仃岛薇甘菊危害的生态经济损失分析. 热带亚热带植物学报, 12(2): 167-170.
- 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 廖文波, 周云龙, 咎启杰, 王勇军, 2005. 薇甘菊对内伶仃岛植被危害的相关分析. 应用生态学报, 16(2): 350-354.
- 郑亚萍, 余涵霞, 张昕宇, 欧巧菁, 岳茂峰, 李伟华, 2021. 薇甘菊化感物质对土壤氮素矿化的影响及其化感利己作用. 生物安全学报, 30(2): 110-119.
- ISMAIL B S, KUMAR A, 2002. Effects of aqueous extracts and decomposition of *Mikania micrantha* H.B.K. debris on selected agronomic crops. *Weed Biology And Management*, 2: 31-38.
- QIAO X, LI Y Z, SU G Y, TIAN H K, ZHANG S, SUN Z Y, YANG L, WAN F H, QIAN W Q, 2020. MmNet: identifying *Mikania micrantha* Kunth in the wild via a deep Convolutional Neural Network. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(5): 1292-1300.
- SWAMY P S, RAMAKRISHNAN P S, 1987. Weed potential of *Mikania micrantha* H.B.K., and its control in fallows after shifting agriculture (JHUM) in Northeast India. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 18(3): 195-204.
- ZHANG L Y, YE W H, CAO H L, FENG H L, 2004. *Mikania micrantha* H B K in China—An overview. *Weed Research*, 44(1): 42-49.