

基于 InVEST 模型的崇明岛野生蜜蜂传粉服务功能分析

张瑞峰^{1,2}, 王多多^{1,2}, 周梦云^{1,2}, 蔡永立^{1,2*}

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学上海市城市化过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 传粉是生态系统的一项重要服务功能, 而蜜蜂是传粉服务中最重要的传粉者。我国对野生蜜蜂传粉的研究文献较少。对丰度进行模拟可以更好地保护野生蜜蜂及其生境, 节约其传粉成本, 达到保护和利用野生蜜蜂资源的目的。通过运用 InVEST 模型传粉者丰度模块对崇明岛的野生蜜蜂丰度进行模拟, 并利用 ArcGIS 技术对结果进行分析。结果表明: (1) 农田周围有适当林地分布, 且建设用地、水体和滩涂区域较少, 野生蜜蜂的丰度会较高, 得到较好的野生蜜蜂传粉服务; (2) 崇明岛中西部地区农田野生蜜蜂丰度较高, 应维持该区域的农田不受破坏, 避免在该区域新建建筑和开发旅游区域, 农田应种植需要昆虫授粉的作物; 岛屿边缘和东部农田区域的野生蜜蜂丰度较低, 应增加林地和花圃种植, 同时控制人类活动区域以创造更适宜野生蜜蜂的生境; (3) 应根据野生蜜蜂丰度格局对作物的播种方案制定长期的计划, 将大面积种植的西瓜、柑橘等需要昆虫传粉服务的作物移至中西部野生蜜蜂丰度较高的区域, 以充分利用和保护野生蜜蜂资源, 而将传粉服务要求较低的短期作物移至野生蜜蜂丰度较低的区域。

关键词: 野生蜜蜂; InVEST 模型; 丰度; 传粉服务; 崇明岛

中图分类号: S891; Q148

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)01-0037-08

Pollination service analysis of Chongming wild bee based on InVEST model

ZHANG Rui Feng^{1,2}, WANG Duoduo^{1,2}, ZHOU Mengyun^{1,2}, CAI Yongli^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241;

2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-restoration, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract: Pollination is an important service function of ecosystem, and bees are the most important pollinators in pollination service; however, research on wild bee pollination in China is still very limited. Simulation of the wild bee abundance can protect wild bees and their habitats and save pollination costs to better protect and exploit wild bee resources. The abundance of wild bee was investigated by pollinator abundance using the crop pollination module of InVEST model and the result was analyzed by ArcGIS. The results showed that: (1) When the farmland nearby forest and has a small area of building and wetland, the wild bee abundance in this area was higher and the farmland received a better wild bee pollination service. (2) The farmland in the midwest area of Chongming Island had higher wild bee abundance than in other areas. This area should be protected and crops needing insect pollination should be cultivated and new architecture should be avoided and new development of tourism should be limited. The farmland in the east and near the border of Chongming Island has lower wild bee abundance. More trees and flowers should be planted to create a more suitable habitat for wild bees. (3) A long-term crop production plan in Chongming Island should be made based on the pattern of wild bee abundance. It is recommended that crops such as watermelon and oranges that need insect pollination service should be planted in the midwest of Chongming Island to protect and utilize the wild bee resources. And crops that need less insect pollination service should be planted in the east and border areas of Chongming Island.

Key words: wild bee; InVEST model; abundance; pollination service; Chongming Island

传粉服务是一项重要的生态系统服务, 也被列为濒危的生态系统服务^[1]。大部分有花植物(被子

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31670474)和科技部重大研发计划“长三角城市群区域生态承载力评估与提升技术研究”(2016YFC0502701)共同资助。

作者简介: 张瑞峰, 硕士研究生。E-mail: 51143901114@ecnu.cn

* 通信作者: 蔡永立, 教授, 博士生导师。E-mail: ylcai@geo.ecnu.edu.cn

植物)需要经过授粉才能结实和繁衍,因此传粉是维持生态系统稳定的重要过程。昆虫传粉是生态系统传粉服务的重要部分,在已知的开花作物中有约65%的作物需要昆虫传粉,昆虫的传粉服务占有所有动物传粉服务的80%~85%^[2-3]。在传粉昆虫中,蜜蜂总科(Apoidea)是种类最多、数量最大的类群^[4]。野生蜜蜂是自然界中未被人类驯化的自然生存的蜜蜂,由于其分布广泛,对环境的适应能力通常强于家养蜜蜂^[5-7],被广泛利用于农作物生产,同时也能降低对作物授粉服务的成本,提高作物的质量和产量^[8-10]。近年来的研究表明,包括野生蜜蜂在内的野生传粉昆虫的数量由于农药的使用、单一化种植等原因正在持续减少,传粉昆虫多样性和丰度出现下降的趋势^[11-12]。适宜的生境能为野生蜜蜂提供合适的筑巢地点以及稳定的食物来源,是当地野生蜜蜂丰度和多样性的决定因素。野生蜜蜂的丰度高低直接影响着生态系统所能提供的传粉服务水平,进而影响到当地农作物产量和野生植物的生存^[13-14],因此对野生蜜蜂生境的保护是保护野生蜜蜂的关键。然而,随着我国城市化水平的提高,野生蜜蜂的生境受到土地利用变化和农作物频繁更替带来的巨大威胁^[1,15-17],因此对野生蜜蜂资源及其生境的保护是十分迫切的。

国外对于昆虫传粉的研究起步早,研究方向多样,研究程度较深。野生蜜蜂作为生态系统传粉服务功能的重要载体,对野生蜜蜂的研究也受到了欧美国家的高度重视。而近年来不断有研究结果显示欧洲和北美地区包括野生蜜蜂在内的传粉动物多样性和丰度出现了下降的趋势^[18-20],这也导致了传粉服务减退和作物产量下降的问题,对于传粉动物多样性和丰度的研究成为了关注的焦点^[1,21]。国外多个地区已经建立了系统的野生传粉蜜蜂丰度监测和评价体系。早在1947年,美国农业部农业局(USDA-ARS)就在犹他州建立了实验室,主要开展对人工饲养蜜蜂和野生蜜蜂授粉服务的研究,并制定了一套对蜜蜂从初期的种类调查到最后应用到传粉服务中的实验方案^[4,22]。欧洲议会STOA(Scientific and Technical Options Assessment),Mons和Cemblous实验室以及世界自然保护联盟,联合国环境规划署等机构和组织都已建立传粉蜜蜂监测和评价体系^[23-24]。但由于对传粉者丰度进行考察和监测需要耗费极大的人力和物力,因此对传粉者丰度的模拟研究逐渐受到了关注。Nogué等^[25]对欧洲野生蜜蜂丰度进行模拟以寻找提高授粉效果的方法,Groff等^[26]则通过对美国蓝莓种植地野生蜜

蜂丰度进行模拟以比较和修正InVEST(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs,环境服务和交易的综合评估模型)传粉者丰度模型(Pollinator Abundance: Crop Pollination)。通过对野生蜜蜂丰度的模拟,可有效地指导野生蜜蜂生境的保护,并更好的利用生态系统所能提供的传粉服务功能,同时可以优化当地农业作物种类以节约生产成本并提高作物产量^[27],这为研究野生蜜蜂传粉服务的利用和保护提供新的途径。我国对野生蜜蜂传粉服务的研究起步较晚,研究深度也明显不足^[28],尚未建立有效的昆虫或野生蜜蜂的监测和评价体系以及保护昆虫或野生蜜蜂生境的政策^[29]。这对保护我国野生蜜蜂资源及其生境,充分利用生态系统所能提供的传粉服务显然是不利的。

上海是人口超过2400万的国际大都市,崇明岛则是上海重要的农业和菜篮子基地,对保障上海城市新鲜农产品的供应具有十分重要的作用。崇明岛的农作物种类较多,更替速度快,不同作物对传粉服务的需求存在明显差异,但目前对崇明岛野生传粉蜜蜂的丰度情况及野生传粉蜜蜂所能带来的传粉服务水平缺乏认识,不能有效地指导当地野生蜜蜂及生境的保护,也难以充分利用当地的野生蜜蜂传粉服务功能。为此,本研究利用崇明岛的遥感数据和野生蜜蜂数据,运用InVEST模型的传粉者丰度模块对崇明岛野生蜜蜂丰度等数据进行了模拟并通过ArcGIS平台对结果进行分析。以期当地野生蜜蜂及生境保护提供指导,利用当地野生蜜蜂传粉服务以降低作物授粉成本,提高作物产量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海崇明岛地区(31°27'00"~31°51'15"N, 121°09'30"~121°54'00"E)处于长江入海口,是我国第3大岛,岛屿总面积约1267 km²,全岛地势平坦,气候温和湿润,年平均温度15.8℃,是世界上最大的河口冲积岛。岛内以农业生产为主,耕地面积约为50000 hm²,农作物年总播种面积超过90000 hm²,是上海市重要的农业基地。岛内主要农作物为小麦、水稻、西瓜、柑橘和多种蔬菜,其中西瓜和柑橘等多种作物有着较高的昆虫传粉需求,小麦、水稻等大田作物则对昆虫传粉需求较小。

同时,由于崇明岛地表覆盖类型较为简单,用地类型的类别较少,野生蜜蜂的种类较为稳定,适合运用InVEST模型对当地野生蜜蜂丰度进行模拟。

1.2 监督分类

由于 InVEST 模型需要当地的土地利用类型图, 因此利用 ArcGIS 软件对崇明岛的土地利用类型用最大似然法进行监督分类。最大似然法分类也称作贝叶斯 (Bayes) 分类, 是目前监督分类中最常用的分类方法。最大似然法基于 Bayes 准则的基础上, 偏重于集群分布的统计特性, 同时假定训练样本数据在光滑空间符合高斯正态分布。最大似然法监督分类首先要确定各类的训练样本, 然后根据训练样本计算出不同土地利用类型的统计特征值, 对它们建立分类判别函数, 最后通过对影像所有像元的逐点扫描, 将像元特征向量代入判别函数求出其属于各土地利用类型的概率, 并将该像元归入概率最大的土地利用类型中。该分类方法错误最小精度最高, 是较好的一种分类方法。

最大似然法的分类公式为:

$$D = \ln(a_c) - [0.5 \ln(|Cov_c|) - 0.5(x - M_c)^T (Cov_c^{-1})(x - M_c)] \quad (1)$$

式 (1) 中 D 为加权距离 (可能性), c 为某一特征类型, x 为像素的测量矢量, M_c 为类型 c 的样本平均矢量, a_c 为任一像素属于类型 c 的百分概率 (缺省值为 1.0), Cov_c 为类型 c 的样本中的像素的协方差矩阵。

通常监督分类的结果无需进行人工纠错, 但本研究为避免监督分类过程中人为因素、训练样本的选择、同一土地利用类型光谱差异等因素造成的误差, 通过实地考察结果对监督分类结果进行了修正。

1.3 InVEST 模型模拟原理

InVEST 模型首先根据土地利用和土地覆盖图 (LULC map), 对每一个栅格分配其属性, 然后估计每个栅格中野生蜜蜂的筑巢可能性和存在蜜蜂食物的可能性。然后再根据这些数据和每种野生蜜蜂的标准觅食范围, 将周围栅格中的花赋予相对远处栅格的花更高的权重, 然后确定每个栅格中每种传粉者的丰度指数。由巢穴和食物来源限制的传粉者种类 β 在栅格 χ 中的丰度为:

$$P_{x\beta} = N_j \frac{\sum_{m=1}^M F_{jm} e^{-\frac{D_{mx}}{\alpha_\beta}}}{\sum_{m=1}^M e^{-\frac{D_{mx}}{\alpha_\beta}}} \quad (2)$$

式 (2) 中, N_j 是土地覆盖类型 j 的筑巢适应性, F_j 是土地覆盖类型 j 花粉相对量, D_{mx} 是栅格 x 和 m 之间的欧氏距离, α_β 是传粉者种类 β 的预期觅食距离^[30]。式 (2) 将计算出每个物种在所有栅格中的丰度指数, 丰度结果的范围在 0~1。这将提供野生蜜蜂授粉服务的潜在来源, 但是还没有纳入每个栅

格的需求。即如果某个栅格中没有需授粉的作物, 那么蜜蜂不会提供作物授粉的服务。为了在“供应”和“需求”间建立连接, 模型通过再次使用传粉者物种的飞行范围来模拟它们在附近的栅格中的觅食以计算在每个农业栅格中访问蜜蜂的丰度指数。它将围绕每个农业栅格中的授粉者供应值相加, 给予附近栅格更大的权重。在每个农业栅格中每种传粉者的丰度的总和即是这个农业栅格中传粉者的丰度指数。根据式 (2) 的框架确定每个农作物栅格上的蜜蜂的相对丰度即为:

$$P_{ox\beta} = \frac{P_{x\beta} e^{-\frac{D_{ox}}{\alpha_\beta}}}{\sum_{x=1}^M e^{-\frac{D_{ox}}{\alpha_\beta}}} \quad (3)$$

式 (3) 中 P_{xy} 是传粉者类型 β 在栅格 x 上的供应量, D_{ox} 是栅格 x 到农业栅格 o 之间的距离, α_β 是传粉者种类 β 的标准觅食距离。这样就得到了修正后的农业栅格中的相对授粉服务程度^[31]。作物对于昆虫传粉的依赖程度会决定传粉者所能带来的经济价值, 因此 InVEST 模型使用了一种较为简单的饱和作物产量函数。该函数假设产量随着传粉者访问的增加而增加, 但是收益逐渐降低。预期农业栅格 o 上的作物 c 的产量为:

$$Y_{o\beta} = 1 - v_c + v_c \frac{P_{o\beta}}{P_{o\beta} + \kappa_c} \quad (4)$$

式 (4) 中 v_c 代表野生昆虫对作物 c 授粉的重要度 (v_c 的值在 0~1 之间, 0 代表完全不依靠野生昆虫传粉, 1 代表完全依靠野生昆虫传粉), κ_c 是一个半饱和常数, 代表作物达到 50% 传粉者依赖性产量时所需的传粉者丰度。当模型计算出每个农业栅格的价值后, 就会将这个值重新分配给提供周围提供了传粉者的栅格, 从而得到栖息地价值的分布图。首先, 模型将把每个栅格的价值根据不同传粉者对所有区域的贡献程度分配至各个蜜蜂种群中。然后每个物种的价值被重新分配回提供了这个物种的栅格中, 这个步骤使用了与上述相同的距离加权关系, 因此, 较近的栖息地会比远处的栖息地提供更大的传粉服务价值。最终模型计算出每一个栅格 m 提供给农业栅格 o 的传粉服务:

$$PS_{x\beta} = v_o P_{x\beta} \frac{\sum_{m=1}^M Y_{o\beta m} \frac{P_{o\beta m}}{P_{o\beta m} + \kappa_c}}{\sum_{m=1}^M e^{-\frac{D_{mx}}{\alpha_\beta}}} \quad (5)$$

式 (5) 中 v_o 代表农业栅格 o 处的作物价值。最终结果将得到“传粉者服务价值”的分布图, 模

拟传粉者对农业地区提供的经济价值的相对指数。

研究区域的地土地类型图及土地类型属性表、研究区域传粉者种类及其筑巢方式和标准飞行距离数据。

1.4 数据来源

InVEST 模型传粉者丰度模块的运行需要提供

表 1 土地覆盖类型适宜性

Table 1 Land cover suitability values

地表覆盖类型 Land cover	地面筑巢系数* Ground nesting	洞穴筑巢系数* Cavity nesting	夏秋季食物系数* Summer and autumn forage
水体 Water body	0	0	0
滩涂 Wetland	0.1	0.05	0.5
林地 Forest	0.6	0.9	0.3
建设用地 Construction land	0.3	0.2	0.4
农田 Field	0.7	0.2	0.7

注: *数据参考于 Groff 等^[26], 根据崇明岛植物特点有部分调整。

Note: *Data refer to Groff et al.^[26], and according to the characteristics of plants in Chongming Island, which have been adjusted

表 2 崇明岛野生蜜蜂种类*

Figure 2 Wild bee species in Chongming Island

种类 Species	筑巢方式 Nest substrate	标准飞行距离/m* Typical foraging distance
中华蜜蜂 <i>Apis cerana</i>	地面/洞穴 Ground/Cavity	2 340
黄胸木蜂 <i>Xylocopa appendiculata</i>	洞穴 Cavity	3 670
粗切叶蜂 <i>Megachile sculpturalis</i>	地面/洞穴 Ground/Cavity	1 724
地花蜂 <i>Andrenidae</i>	地面 Ground	500
隧蜂 <i>Halictidae</i>	地面 Ground	100

注: *数据参考于 Groff 等^[26]、贺春玲等^[33]、吴燕如和周勤^[34]。

Note: *Data refer to Groff et al.^[26], He Chunling et al.^[33], Wu and Zhou^[34].

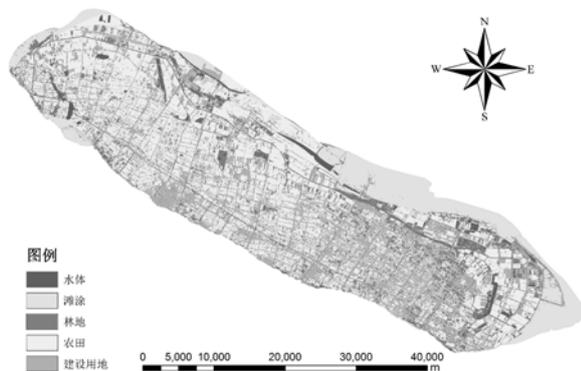


图 1 崇明岛土地覆盖类型

Figure 1 Land cover types of Chongming Island

为满足 InVEST 模型模拟野生蜜蜂丰度的数据需求, 本研究使用 ArcGIS 软件运用最大似然法对崇明岛区域 Landsat 8 卫星图像进行监督分类, 并基于监督分类结果和卫星影像进行人工纠错。为了取得更好的监督分类结果, 选取了 2015 年 8 月 3 日的卫星图像, 故本研究主要对象是崇明岛夏秋季农田的野生蜜蜂丰度并以此分析崇明岛野生蜜蜂的生境保护对策和资源利用方法。因此结合崇明岛土地利用类型的实际情况, 将崇明岛的土地利用类型分为

5 个大类: 水体 (包括人造养殖池及湖泊、河流等自然水体)、滩涂、林地、建设用地和农田 (图 1)。土地覆盖的适宜性属性参考于 Groff 等^[26], 结合崇明岛夏秋季各土地利用类型中植物特点进行部分调整 (表 1)。根据荣亮^[32]对崇明岛昆虫种类的调查结果, 崇明岛存在的传粉蜜蜂有中华蜜蜂、意大利蜂、黄胸木蜂、粗切叶蜂、地花蜂科和隧蜂科等物种。其中, 野生意大利蜂因为在我国野外环境下无法存活, 故不在研究范围内。根据 Greenleaf 等^[30]的研究, 蜜蜂的标准觅食距离与蜜蜂的自重和体型有关, 由于缺少崇明岛野生蜜蜂的相关研究, 故以其他研究中的蜜蜂数据作为参考 (表 2)。崇明岛目前所种植的作物种类多样, 西甜瓜、果树和多种蔬菜作物可以为不同蜜蜂种类提供合适的蜜源。

2 结果与分析

InVEST 模型以每个栅格可能提供的筑巢环境和食物为基础, 根据每种野生蜜蜂的筑巢方式和标准飞行距离模拟出各类蜜蜂在每个栅格中筑巢的概率, 然后得出各类蜜蜂巢穴在每个栅格中的相对值以形成巢穴丰度模拟图 (图 2)。最后通过综合所有

蜜蜂种类的巢穴丰度模拟情况, 得到每个栅格中所有野生蜜蜂种群巢穴丰度的相对值, 最终得到野生蜜蜂巢穴丰度模拟图 (图 3)。

InVEST 模型的模拟结果显示, 岛内存在的 5 种蜜蜂种类在崇明岛的巢穴分布情况有显著差异, 而造成这种差异的主要原因是蜜蜂的筑巢方式的不同。中华蜜蜂和粗切叶蜂可适应多种筑巢环境, 农田和林地都可以为其提供合适的筑巢场所, 因此在全岛均有所分布。在东平国家森林公园以及岛屿西部农田林地交错的地带的巢穴丰度较高。地花蜂和隧蜂常在土中筑巢, 对这 2 种蜜蜂而言农田区域是比林地区域更好的筑巢环境, 因此在全岛的农田范围内的巢穴丰度较高。黄胸木蜂的巢穴一般在树木和干燥的木材中, 农田区域难以为其提供良好筑巢

环境, 因此黄胸木蜂主要分布在全岛的林地区域中。

通过 ArcGIS 软件对崇明岛整体的野生蜜蜂巢穴丰度的模拟结果进行统计 (表 3), 结果显示不同用地类型中巢穴丰度的差异较大, 林地的平均巢穴丰度要高于农田区域, 建设用地和滩涂区域的蜜蜂巢穴丰度较低。而每种用地类型中也同样存在着一定的差异, 除水体外其余 4 种用地类型的变异系数均在 12% 以上。

为统计岛屿边缘区域各土地利用类型的野生蜜蜂巢穴丰度结果, 运用 ArcGIS 软件中的 Buffer 工具对岛屿边缘 (滩涂内侧), 建立侧类型 Left, 末端 Round 的 500 m、1 000 m 和 1 500 m 范围的缓冲区。分别统计不同缓冲区范围内, 所有土地类型、林地和农田的野生蜜蜂巢穴丰度。

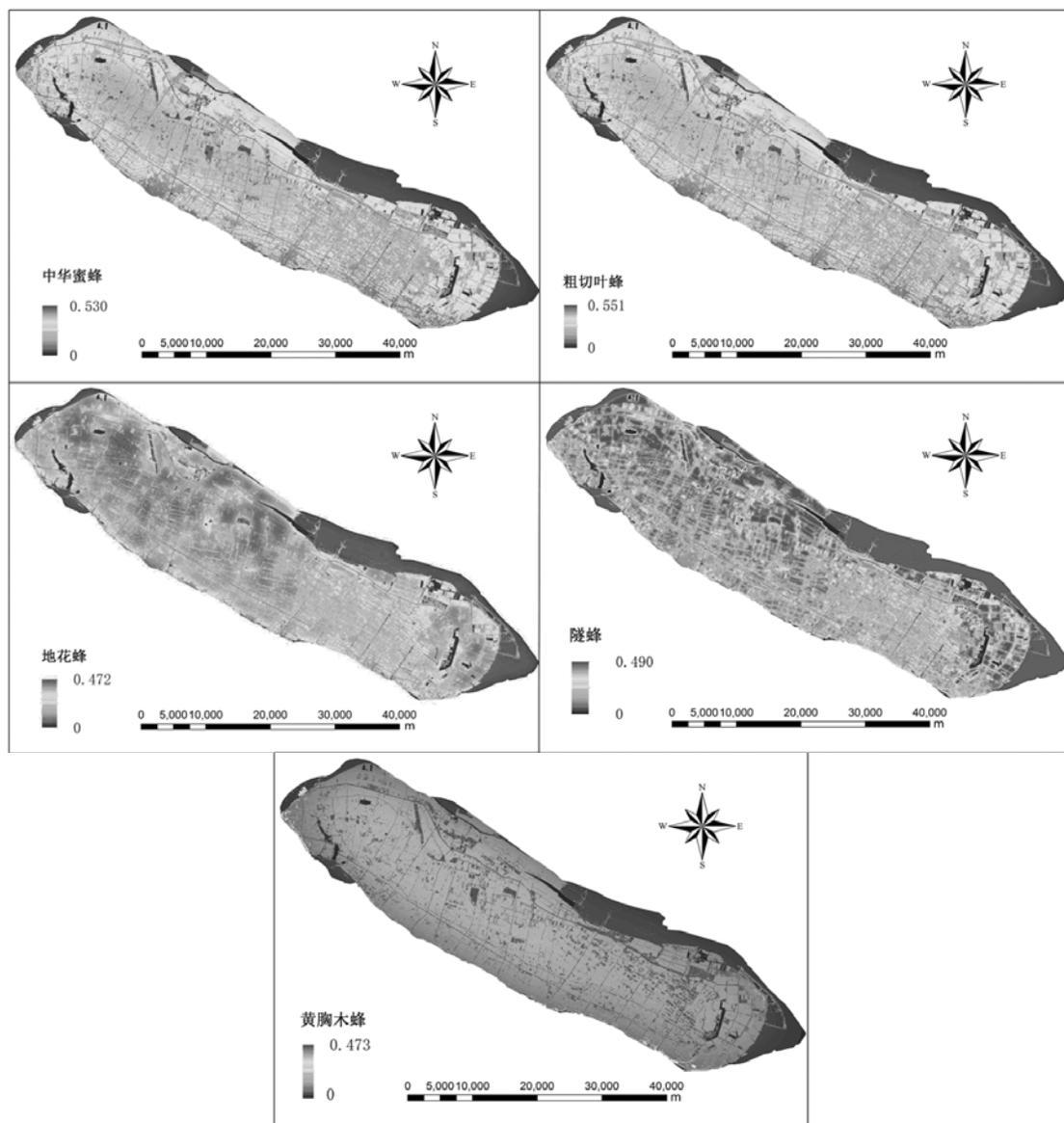


图 2 崇明岛不同野生蜜蜂种群巢穴丰度模拟

Figure 2 Simulation maps of the wild bee nest abundance index for each bee species in Chongming Island

表 3 崇明岛各土地覆盖类型野生蜜蜂巢穴丰度

Table 3 Abundance of wild bees nest in different land cover types in Chongming Island

区域 Area	全岛总体 Islandwide	全岛林地 Forest	全岛农田 Field	全岛建设用地 Construction land	全岛滩涂 Wetland	全岛水体 Water body
平均值 AVG	0.232	0.349	0.312	0.129	0.034	0
标准差 STD	0.123	0.056	0.038	0.019	0.005	-
变异系数 CV	53.02%	15.95%	12.21%	14.77%	14.48%	-

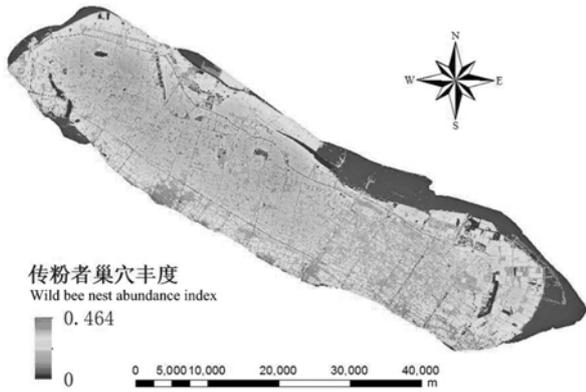


图 3 崇明岛野生蜜蜂巢穴丰度模拟

Figure 3 Simulation maps of the wild bee nest abundance index in Chongming Island

缓冲区内统计结果发现林地和农田类型在岛屿边缘处的野生蜜蜂巢穴丰度均远低于岛屿内部(表4)。在岛屿边界 500 m 缓冲区内林地和农田范围的平均巢穴丰度仅有 0.260 和 0.246, 远低于全岛林地和全岛农田的 0.349 和 0.312, 并且变异系数均超过 16%。当缓冲区大小扩展至 1 500 m 范围后, 2 种用地类型的平均巢穴丰度值均有所上升但仍然远低于这两种用地类型在全岛的平均值, 但变异系数

已经接近于全岛的数值。因在岛屿边界筑巢影响野生蜜蜂的觅食范围是岛屿边界附近的野生蜜蜂丰度会降低的重要原因。而岛屿边界野生蜜蜂巢穴丰度的大幅下降也是野生蜜蜂巢穴丰度在同种土地利用类型中有一定差异的重要原因。

东平国家森林公园中的林地区域有着较高的野生蜜蜂巢穴丰度, 公园整体丰度由外向内逐渐降低, 由最高的 0.423 降低至 0.365。崇明岛西部地区与农田相间的林地区域, 是全岛野生蜜蜂巢穴最高的区域, 丰度平均超过了 0.400。而东部地区沪陕高速沿线、陈家镇周边的林地区域巢穴丰度均在 0.350 以下。适宜的生境比例是蜂群多样性和野生蜜蜂丰度的决定因素^[14], 林地和农田交错分布将为不同蜜蜂种类均提供适宜的筑巢地点以及稳定的来源。因此, 西部地区农田与林地交错分布的方式将为野生蜜蜂提供更为适宜的生境。而东部地区有着大量建筑和滩涂, 这 2 种用地类型不适宜蜜蜂进行筑巢也无法提供足够的食物来源, 同时岛屿东部农田与林地区域的分布较为集中, 导致该区域林地和农田中的野生蜜蜂平均巢穴丰度低于西部区域。

表 4 崇明岛边界缓冲区中野生蜜蜂巢穴丰度

Table 4 Abundance of wild bees nest in Chongming Island border

缓冲区类型 Buffer area	所有用地类型 Islandwide			林地 Forest			农田 Field			
	范围/m Radius	500	1 000	1 500	500	1 000	1 500	500	1 000	1 500
平均值 AVG		0.186	0.201	0.212	0.260	0.278	0.289	0.246	0.258	0.267
标准差 STD		0.097	0.099	0.099	0.045	0.046	0.046	0.039	0.036	0.035
变异系数 CV		52.42%	49.00%	46.43%	17.36%	16.50%	15.86%	16.05%	14.03%	13.00%

根据 InVEST 模型的模拟结果, 崇明岛不同地区农田的野生蜜蜂丰度差异较大(图4)。岛屿中西部地区农田和林地区域相互交错, 为不同种类的蜜蜂均提供了良好的食物来源和筑巢地点, 各蜜蜂种群在此区域的巢穴丰度均较高, 因此该区域的野生蜜蜂丰度远高于岛中其他地区。岛屿中东部地区由于建设用地较多, 能为蜜蜂提供生境以及足够食物来源的区域有限, 因此该区域的野生蜜蜂丰度较低。

岛屿东端的大片农田, 由于距离滩涂较近, 且周围建设用地较多、林地区域有限, 因此野生蜜蜂丰度略低于中西部地区。岛屿边缘处由于的巢穴丰度较低, 所以边缘附近的农田区域野生蜜蜂的丰度也远低于岛屿内部区域。

野生蜜蜂的丰度高低将影响该区域野生蜜蜂提供的传粉服务水平, 从而影响该区域农作物的产量及其经济价值^[13]。因此, 崇明岛内农田区域传粉服

务价值与野生蜜蜂的丰度趋势相同(图5)。野生蜜蜂丰度和其所带来的传粉服务价值可以为崇明岛不同区域的种植选择提供参考。

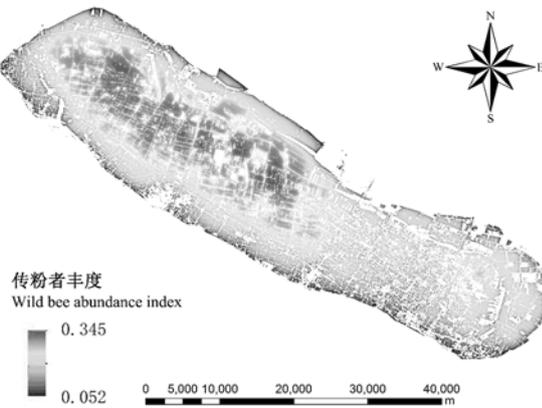


图4 崇明岛农田区域野生蜜蜂丰度模拟

Figure 4 Simulation maps of the wild bee abundance index in Chongming Island

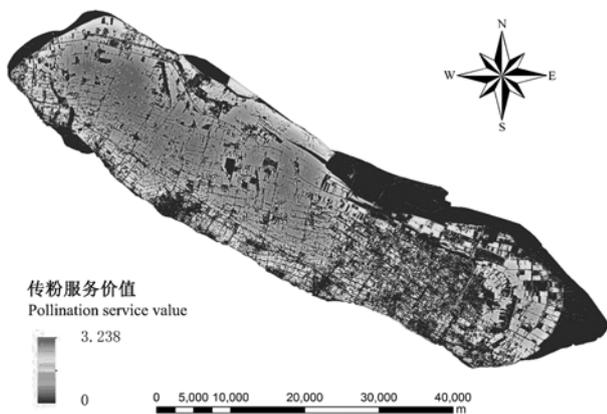


图5 崇明岛农田区域传粉服务价值模拟

Figure 5 Simulation maps of the pollination service value index in Chongming Island

3 讨论与结论

本研究的方法可用于不同尺度和地区中, 本研究着眼于分析崇明岛野生蜜蜂的丰度格局, 探索充分利用生态系统传粉服务功能和保护野生蜜蜂及其生境的策略, 研究结果对当地野生蜜蜂资源的保护和利用具有重要的指导作用。但是由于国内对野生蜜蜂的调查和研究较为薄弱, InVEST 模型使用的数据精准度有限, 国内又缺乏相关的模拟分析结果进行对比, 因此本研究中 InVEST 模型模拟结果的精确性仍有待验证。近年来, 在我国利用野生蜜蜂为农林作物授粉有了长足的发展, 但与发达国家相比, 野生蜜蜂的应用基础研究尚存在较大差距^[4]。为获得更加精确的丰度模拟结果, 更充分地利用和保护野生蜜蜂资源, 仍需进行长期细致的调查和研究。

本文结论如下:

(1) 农田周围有适当的林地分布且水体、滩涂和减少用地的分布较少, 该农田区域的野生蜜蜂丰度会相对较高, 野生蜜蜂将提供更好的传粉服务。而岛屿边界的野生蜜蜂巢穴丰度较低, 所能提供的传粉服务有限。由于不同蜜蜂对于生境的需求不同, 多种适宜生境的交错分布将为不同种类的蜜蜂都提供良好的筑巢地点和食物来源。农田能够为蜜蜂提供食物来源但无法提供树洞等筑巢环境, 因此当农田周围存在适当的林地时, 该区域可为更多蜜蜂种类提供适宜的生境。而水体、滩涂、建设用地和岛屿边界区域无法为野生蜜蜂提供适宜的生境, 农田接近这些区域会导致该农田区域的野生蜜蜂传粉服务水平下降。

(2) 根据模拟结果发现, 崇明岛中西部区域野生蜜蜂平均丰度是全岛最高的区域, 应加强对该区域野生蜜蜂生境的保护, 维持或提高农田和林地的比例, 避免在该地区新建建筑及养殖池等人工设施, 控制旅游开发区域, 减少人类活动。同时在该农田区域应播种对昆虫传粉有需求的蜜源作物以充分利用当地的野生蜜蜂传粉服务功能并为野生蜜蜂提供食物来源。崇明岛东部区域及岛屿边界附近的农田处野生蜜蜂丰度较低, 所能提供的传粉服务功能有限, 现阶段适合播种对传粉服务要求较低的作物。可将东部地区部分农田、建筑或水体改为林地, 同时在农田、道路附近留出一定的荒芜边缘并设置人工蜂巢、构筑土墙, 增加该区域的花圃面积, 减少农田及周边区域的人类活动, 创造更加适合野生蜜蜂的筑巢和觅食环境, 以期提高东部地区的野生蜜蜂丰度和野生蜜蜂传粉服务水平。崇明岛中东部区域以城镇为主, 农田面积较少且分布较为分散, 该区域的野生蜜蜂的丰度和能提供的传粉服务均较低, 建议该区域农田应选择对昆虫传粉服务需求较低的作物进行种植, 同时可以对该区域的农田和建设用地区域进行整合, 或将崇明岛城镇建设必须占用的土地规划在该区域内。

(3) 崇明岛近年来除粮食作物外大面积种植西瓜和柑橘, 这两种水果都需要昆虫进行传粉, 有效的利用崇明岛的野生蜜蜂传粉服务功能可以减少人工饲养蜜蜂的数量或减少人工授粉的比例, 可以达到降低生产成本和提高产量的目的。崇明岛中西部有面积野生蜜蜂丰度较高的农田区域, 并且周围建筑及水体较少。因此这一地区十分适合西瓜和柑橘的长期种植。这不仅能降低作物的生产成本, 提高作物产量, 也可以为该区域的野生蜜蜂提供稳定

的食物来源,这对野生蜜蜂的保护有着重要的意义。因此可根据农作物的生产要求,有计划的将西瓜、柑橘或其他长期种植且需要传粉服务的作物播种在该区域,并在非种植季节播种适合在崇明生长的蜜源作物,为野生蜜蜂提供充足的食物来源。同时将短期、小规模种植或无需昆虫传粉作物转移到野生蜜蜂丰度较低的区域。

参考文献:

- [1] STEFFAN-DEWENTER I, POTTS S G, PACKER L. Pollinator diversity and crop pollination services are at risk[J]. *Trends Ecol Evol*, 2005, 20(12):651-652.
- [2] RICHARDS A J. Does low biodiversity resulting from modern agricultural practice affect crop pollination and yield?[J]. *Ann Bot-London*, 2001, 88(2): 165-172.
- [3] MCGREGOR S E. Insect pollination of cultivated crop plants[M]. Washington D C: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1976.
- [4] 李捷, 朱朝东, 王凤鹤,等. 野生蜜蜂及其传粉作用的研究现状[J]. *生物多样性*, 2007, 15(6): 687-692.
- [5] O'TOOLE C, RAW A. Bees of the world [M].London: Blandford Press, 1991: 34-44.
- [6] ROUBIK D W. Pollination of cultivated plants in the tropics [M]. Rome:Food and Agriculture Organization, 1995.
- [7] CANE J H. Lifetime monetary value of individual pollinators: the bee *Habropoda laboriosa* at rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei* Reade)[C]//VI International Symposium on *Vaccinium Culture* 446. 1996: 67-70.
- [8] 吴燕如. 发展传粉昆虫增加作物产量[J]. *中国蜂业*, 1984(6): 6-8.
- [9] FREE J B. Insect pollination of crops[M]. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 1993.
- [10] 吴燕如, 周勤. 中国动物志:昆虫纲:第四十四卷:膜翅目:切叶蜂科[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] KEVAN P G, CLARK E A, THOMAS V G. Insect pollinators and sustainable agriculture[J]. *Am J Alternative Agr*, 1990, 5(1): 13-22.
- [12] BIESMEIJER J C, ROBERTS S P M, REEMER M, et al. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands[J]. *Science*, 2006, 313(5785): 351-354.
- [13] KEARNS C A, INOUE D W, WASER N M. Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1998, 29(1): 83-112.
- [14] RICKETTS T H, REGETZ J, STEFFAN-DEWENTER I, et al. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?[J]. *Ecol Lett*, 2008, 11(5): 499-515.
- [15] KREMEN C, WILLIAMS N M, AIZEN M A, et al. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change[J]. *Ecol Lett*, 2007, 10(4): 299-314.
- [16] POTTS S G, BIESMEIJER J C, KREMEN C, et al. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers[J]. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25(6): 345-353.
- [17] VANBERGEN A J. Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators[J]. *Front Ecol Environ*, 2013, 11(5): 251-259.
- [18] KREMEN C, WILLIAMS N M, THORP R W. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(26): 16812- 16816.
- [19] BIESMEIJER J C, ROBERTS M, REEMER M, et al. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands[J]. *Science*, 2006, 313(5785): 351- 354.
- [20] POTTS S G, BIESMEIJER J C, KREMEN C, et al. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers[J]. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25(6): 345-353.
- [21] KLEIN A M, VAISSIÈRE B E, CANE J H, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops[J]. *Proc Biol Sci*, 2007, 274(1608):303-313.
- [22] TORCHIO P F. Use of *Osmialignaria Say* (Hymenoptera: Apoidea, Megachilidae) as a pollinator in an apple and prune orchard[J]. *J Kansas Entomol Soc*,1976, 49(4): 475-482.
- [23] 李江红, 尤民生. 昆虫授粉研究与应用概述[J]. *福建农林大学学报*, 1999, 28(4): 492-497.
- [24] 谢正华, 徐环, 杨璞. 传粉昆虫物种多样性监测、评估和保护概述[J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48(3):746-752
- [25] NOGUÉ S, LONG P R, EYCOTT A E, et al. Pollination service delivery for European crops: Challenges and opportunities[J]. *Ecol Econ*, 2016, 128: 1-7.
- [26] GROFF S C, LOFTIN C S, DRUMMOND F, et al. Parameterization of the invest crop pollination model to spatially predict abundance of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton) native bee pollinators in Maine, USA[J]. *Environ Modell Softw*, 2016, 79: 1-9.
- [27] PRIESS J A, MIMLER M, KLEIN A M, et al. Linking deforestation scenarios to pollination services and economic returns in coffee agroforestry systems[J]. *Ecol Appl*, 2007, 17(2): 407-417.
- [28] 郭柏寿, 杨继民. 传粉昆虫的研究现状及存在的问题[J]. *西南农业学报*, 2001, 14(4): 102-108.
- [29] 张立微, 张红玉. 传粉昆虫生态作用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(7): 9-13.
- [30] GREENLEAF S S, WILLIAMS N M, WINFREE R, et al. Bee foraging ranges and their relationship to body size[J]. *Oecologia*, 2007, 153(3): 589-596.
- [31] WINFREE R, DUSHOFF J, CRONE E E, et al. Testing simple indices of habitat proximity[J]. *Am Nat*, 2005, 165(6): 707-717.
- [32] 荣亮. 上海市崇明岛昆虫多样性初步研究[D]. 上海:华东师范大学, 2009.
- [33] 贺春玲, 朱朝东, 吴燕如. 木蜂属分类学研究概况[J]. *生物学通报*, 2014, 49(7): 1-3.
- [34] 吴燕如, 周勤. 中国经济昆虫志:第 44 册[M]. 北京: 科学出版社, 1996.