

## 城市绿地中鸟类对小叶榕果实的取食和传播作用

汪国海<sup>1</sup>, 唐创斌<sup>1</sup>, 韦丽娟<sup>2</sup>, 农万廷<sup>1</sup>, 黄秋婵<sup>1</sup>, 董佩佩<sup>1\*</sup>

(1. 广西民族师范学院化学与生物工程学院, 广西崇左 532200; 2. 广西民族师范学院数理与电子信息工程学院, 广西崇左 532200)

**摘要** 2020年9—11月借助Safari 10×42变焦双筒望远镜, 采用焦点扫描法对访问小叶榕(*Ficus microcarpa*)果实的鸟类的取食行为(鸟类种类、取食频次、取食时间、取食量、取食方式和传播距离)进行观察, 同时采用随机森林模型(random forest model)探讨鸟类功能特征对果实取食量和传播距离的影响。结果表明, 小叶榕能吸引6种(1目3科)食果鸟类以整吞的方式取食其果实, 其中红耳鹎(*Pycnonotus jocosus*)、白喉红臀鹎(*Pycnonotus aurigaster*)、白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)是小叶榕果实的主要传播者。不同鸟类对小叶榕果实的取食频次存在显著差异( $t=3.338, df=5, P=0.021$ ), 而取食量、取食时间和访问只数均存在极显著差异。7个变量(访问只数、取食方式、取食时间、翅长、尾长、体重和体长)对果实取食量的解释率为24.31%, 其中鸟类访问只数与果实取食量间存在明显的正相关。鸟类体型特征变量(翅长、尾长、体重和体长)对鸟类传播距离的解释率为17.88%, 其中翅长和体长均与传播距离间存在极显著正相关。说明鸟类的功能特征会影响其对小叶榕果实取食行为, 进而影响其种群的自然更新。

**关键词** 小叶榕; 食果鸟类; 体型特征; 种子传播; 城市绿地

中图分类号 X174 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)07-0053-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.014



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Foraging and Dispersal of Birds on *Ficus microcarpa* Fruit in Urban Green Space

WANG Guo-hai<sup>1</sup>, TANG Chuang-bin<sup>1</sup>, WEI Li-juan<sup>2</sup> et al (1. College of Chemistry and Bioengineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo, Guangxi 532200; 2. College of Mathematics, Physics and Electronic Information Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo, Guangxi 532200)

**Abstract** With Safari 10×42 zoom binoculars, the focus scanning method was adopted to observe the bird foraging behavior (bird species, feeding frequency, foraging time, foraging amount, foraging methods and dispersal distance) of *Ficus microcarpa* fruits from September 2020 to November 2020. At the same time, the random forest model was used to explore the effects of bird functional characteristics on the number of seeds foraging amount and the dispersal distance. The results showed that *Ficus microcarpa* cloud attracted 6 species of frugivorous birds to swallowed the whole fruit, and *Pycnonotus jocosus*, *Pycnonotus aurigaster* and *Pycnonotus sinensis* were the potential seed dispersers of *Ficus microcarpa*. There were significant differences in the foraging times ( $t=3.338, df=5, P=0.021$ ), but there was highly significant difference in the foraging amount, foraging time, foraging numbers. The interpretation rate of seven variables (number of visits, feeding pattern, feeding time, wing length, tail length, body weight and body length) on seed foraging amount was 24.31%, and there was significant positive correlation between the number of visits of birds and the seed foraging amount. The explanation rate of bird body traits (wing length, tail length, body weight and body length) to seed bird dispersal distance was 17.88%, and there was significant positive correlation between wing length and body length and dispersal distance. The result showed that the functional traits of birds would affect the foraging behavior on the fruits of *F. microcarpa*, and then affect the natural regeneration of its population.

**Key words** *Ficus microcarpa*; Frugivorous bird; Morphological characteristics; Seed dispersal; Urban green space

绿地建设是现代城市建设的重要内容,是保护、恢复和提高城市生物多样性的的重要举措<sup>[1]</sup>。但近年来随着城市道路硬化面积的不断扩大,绿地植物的果实或种子很难通过风力和重力作用而就地萌发,导致许多绿地植物的种群更新较为困难。鸟类作为城市生态系统中的重要组成部分,绿地中的植物不仅能为鸟类提供丰富的食物来源<sup>[2]</sup>,同时由于不同鸟类间的食性、行为、体型特征、取食方式、活动模式和生境选择偏好等存在明显差异<sup>[3]</sup>,这些生态功能差异性能提高种子到达适宜萌发的微生境中并占据新的生态位的机会,从而对植物种群的更新、基因流动和物种多样性的维系起着重要作用<sup>[4-5]</sup>。

许多研究表明,不同食果鸟类对同种植物种子传播有效性的贡献存在明显差异,这种贡献差异与鸟类的功能特征有

关,尤其是鸟类的形态功能特征<sup>[6-7]</sup>。如小体型鸟类虽然经常访问目标母树,但其每次访问时取食的果实数量较少且其更倾向于将种子直接沉积在目标母树附近<sup>[3]</sup>;而大型鸟类的访问时间更长且具有较大的鸟喙和消化道容量,能同时以整吞的方式取食大量不同类型的植物种子,加之其较强的飞翔能力和活动范围,能将植物种子传播到不同类型的生境中,从而更有利于植物种群的空间扩散<sup>[8-9]</sup>。此外,这种贡献差异也可能与植物功能特征(母树结实率、果实大小、颜色及次生物质浓度)有关<sup>[10]</sup>。如较高的母树结实率意味其能为鸟类提供充足的食物来源<sup>[11]</sup>,鲜艳的果实颜色能对鸟类形成强烈的视觉吸引作用<sup>[12]</sup>。因此,鸟类对植物种子的传播有效性同时受动植物功能特征影响。

小叶榕(*Ficus microcarpa*)隶属于桑科(Morus)榕属(*Ficus*)常绿植物,在我国广东、广西、贵州等南方地区主要应用于城市道路绿化、园林景观营造以及生态造林等<sup>[13]</sup>。小叶榕果实呈扁球形,成熟后由绿色转为粉红色或紫黑色,符合依赖动物取食后进行传播的特征。但目前对鸟类在小叶榕种子传播中的作用研究鲜见报道。因此该研究以分布在城市绿地中的小叶榕为研究对象,通过观察鸟类对其果实的

**基金项目** 广西民族师范学院高层次人才科研启动项目(2018FG008, 2021BS002);广西壮族自治区教育厅第四批民族院校特色学科建设立项建设学科项目。

**作者简介** 汪国海(1986—),男,广西乐业人,讲师,博士,从事动植物协同进化研究。\*通信作者,讲师,硕士,从事动物营养学研究。

**收稿日期** 2022-05-17

取食行为,探讨鸟类在其种群更新中的作用,为后期进一步研究城市生态系统中的动植物协同进化网络及绿地建设提供基础数据参考。

## 1 研究区域概况与研究方法

**1.1 研究区域概况** 该研究主要在广西民族师范学院校园内(22°23'N, 107°23'E)进行。该区域属于南亚热带季风气候,年平均气温21~22℃;年降雨量1 200 mm,有明显的旱季和雨季之分(雨季4—9月,旱季10月—翌年3月),其中80%的降雨量都集中在雨季;年无霜期达340 d,年日照时数高达1 600 h。校园内种植有大量的果实植物,包括海南蒲桃(*Syzygium cumini*)、秋枫(*Bischofia javanica*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、海桐(*Pittosporum tobira*)等,这些植物果实能为食果鸟类提供大量的食物来源。

**1.2 研究方法** 2020年9—11月,选取5~6株结实率高且易于观察的小叶榕植株作为目标母树,每天06:00—08:00和15:00—17:00借助Safari 10×42变焦双筒望远镜,采用焦点动物扫描法,对访问目标母树的鸟类取食行为进行连续观察,详细记录鸟类种类、取食频次、取食时间、取食量及取食方式(整吞或啄食),直至其离开观察树为止<sup>[14]</sup>。若一群同种鸟类同时访问目标母树,又无法对所有鸟类的取食行为进行同步观察时,则选择最适宜观察的一个个体进行记录<sup>[15]</sup>。将以整吞的方式取食小叶榕果实的鸟类视为种子潜在传播者,同时采用Newcon LR7×40型激光测距仪测量鸟类完成取食后离开母树至初次停留位置间的距离(初停距离),并将其作为种子潜在的传播距离<sup>[16-17]</sup>。所有的观察都在晴朗的天气中进行。

为探讨鸟类取食行为(取食时间、取食频次、访问只数)对种子搬运数量的影响,该研究采用随机森林模型(random

forest model)对鸟类取食行为和种子搬运数量间的关系进行分析,计算出各个变量在模型中的重要性并筛选出主要的影响因子,然后对两者间的关系进行相关性分析。同时以相同的方法分析鸟类的体型特征(体长、体重、翅长和尾长)对种子传播距离的影响。

**1.3 数据处理分析** 采用One-Sample *T*-test对不同鸟类间的取食频次、访问只数、取食时间、取食量、传播距离的差异进行分析;以不同鸟类对小叶榕果实取食方式(啄食或整吞)的频次为基础数据,采用Bipartite功能包绘制取食网络图。鸟类体型特征的所有参数来自《中国鸟类志》<sup>[18]</sup>。所有试验数据均为平均值±标准误( $\bar{x}\pm SE$ )。所有数据的分析均在SPSS 20.00上完成,并将显著水平设定为 $P<0.05$ 。采用R语言(3.6.1)进行作图<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 不同鸟类取食行为差异** 从表1可以看出,研究期间共观察到6种鸟类(1目3科)访问目标母树438次,不同鸟类对小叶榕果实的取食频次( $t=3.338, df=5, P=0.021$ )间存在显著差异,而取食量、取食时间、访问只数间均存在极显著差异( $P<0.01$ )。红耳鹎(*Pycnonotus jocosus*)的取食量最大(2.62颗),取食时鸟类多集群而来,其中暗绿绣眼鸟(*Zosterops japonicus*)的访问只数最大,为4.62只,鹊鸂(*Copsychus saularis*)最少,为2.00只。

从传播距离上来看,不同鸟类间的传播距离存在极显著差异( $t=12.502, df=5, P<0.01$ ),其中白喉红臀鹎(*Pycnonotus aurigaster*)取食后的传播距离最大,为6.06 m(表1)。同时所有鸟类均能以整吞的方式取食小叶榕果实,其中红耳鹎、白喉红臀鹎、白头鹎3种鸟类的取食频次较多,是小叶榕果实的主要传播者(图1)。

表1 取食小叶榕果实的鸟种类

Table 1 Species of frugivorous birds feed on the fruits of *Ficus microcarpa*

鸟种 Bird species	取食频次 Feeding frequency//次	访问只数 Visiting numbers//只	取食量 Foraging amount//颗	取食时间 Foraging time//s	传播距离 Dispersal distance//m
红耳鹎 <i>Pycnonotus jocosus</i>	153	3.69±0.17	2.62±0.09	25.53±0.73	5.44±0.26
白喉红臀鹎 <i>Pycnonotus aurigaster</i>	111	3.13±0.16	2.29±0.09	26.03±0.80	6.06±0.22
白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i>	84	3.05±0.17	2.42±0.11	23.87±0.86	5.14±0.31
黄臀鹎 <i>Pycnonotus xanthorrhous</i>	46	2.22±0.20	2.26±0.12	19.85±1.16	5.48±0.35
暗绿绣眼鸟 <i>Zosterops japonicus</i>	37	4.62±0.23	2.05±0.14	12.38±0.81	5.28±0.47
鹊鸂 <i>Copsychus saularis</i>	7	2.00±0.31	2.29±0.29	20.43±2.62	3.16±0.42

## 2.2 鸟类特征对种子传播的影响

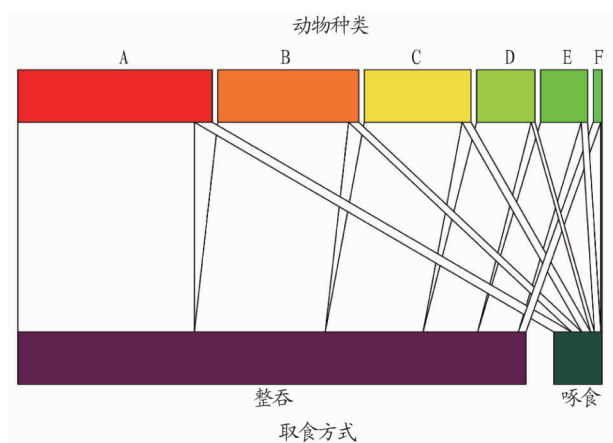
**2.2.1 鸟类取食行为特征对果实取食量的影响。**随机森林模型分析结果表明,7个变量(访问只数、取食方式、取食时间、翅长、尾长、体重和体长)对果实取食量的解释率为24.31%,其中鸟类访问只数对果实取食量的影响最大,且鸟类访问只数和果实取食量间( $r=0.364, P<0.01$ )存在明显的正相关(图2)。

**2.2.2 鸟类体型特征对鸟类传播距离的影响。**对鸟类完成取食后的行为进行追踪,共记录到438个鸟类传播距离。随机森林模型分析结果表明,鸟类体型特征变量(翅长、尾长、体重和体长)对鸟类传播距离的解释率为17.88%,其中翅长

和体长对种子传播距离的影响较大,且体长( $r=0.345, P<0.01$ )和翅长( $r=0.396, P<0.01$ )均与传播距离存在极显著正相关(图3)。

## 3 讨论与结论

自然界中的植物为了吸引更多的鸟类对其种子进行取食和传播,往往会进化出不同类型的果实,其中颜色(黑色和红色)是植物最常用的视觉吸引剂<sup>[12]</sup>。小叶榕果实成熟后会由绿色转为粉红色或紫黑色,果实鲜艳的假种皮能与周围植物的绿色背景形成强烈的视觉反差,从而对空中飞行的鸟类产生强烈的视觉吸引作用<sup>[20]</sup>,且小尺度上大量结实母树的聚集分布易形成较强的广告效应,能间接吸引大量不同种



注:A. 红耳鹎;B. 白喉红臀鹎;C. 白头鹎;D. 黄臀鹎;E. 暗绿绣眼鸟;F. 鹊鸂。连线的宽度越大,说明鸟类以该种方式取食小叶榕果实的频次越多。

Note: A. *Pycnonotus jocosus*; B. *Pycnonotus aurigaster*; C. *Pycnonotus sinensis*; D. *Pycnonotus xanthorrhous*; E. *Zosterops japonicus*; F. *Copsychus saularis*. The greater the width of the connecting line, the more frequent the birds eat the fruit of *Ficus microcarpa* in this way.

图 1 鸟类与小叶榕果实间的取食网络

Fig. 1 Foraging network between birds and fruits of *Ficus concinna*

类和不同体型特征的鸟类对其种子进行取食<sup>[21]</sup>。但研究期间仅发现6种鸟类取食小叶榕的果实,较少的取食鸟类可能

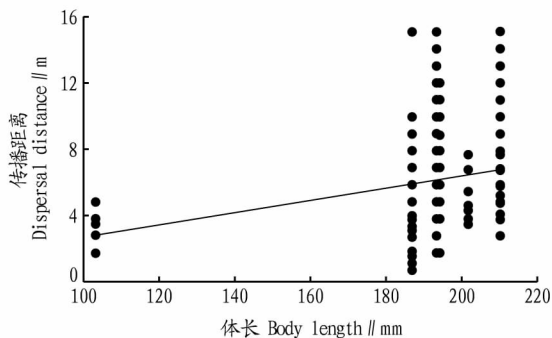


图 3 种子传播距离与鸟类体长(a)和翅长(b)间的相关性

是由于同时期校园中的海桐、秋枫、香樟等肉质果植物也正处于成熟期,可供鸟类选择利用的食物资源较多,从而降低了鸟类对小叶榕果实的取食次数。

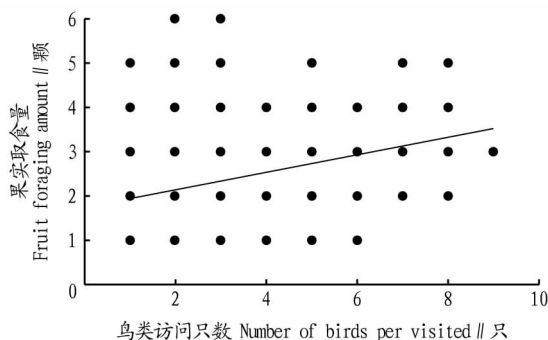


图 2 果实取食量与鸟类访问只数间的相关性

Fig. 2 Relationship between fruit foraging amount and number of birds per visited

鸟类对植物果实或种子的取食方式会直接影响后期植物种群的空间分布<sup>[22]</sup>。例如:果实被鸟类以整吞的方式吞入消化道后,不仅能加快果肉与种皮的分离速度,同时种子还能伴随鸟类移动距离的增加而被传播到距离母树更远的地方以实现种群的扩散;而被鸟类以啄食方式取食的种子会直接沉积在母树周边,从而面临较高的密度制约死亡率<sup>[23]</sup>。该研究中,6种鸟类均能以整吞的方式取食小叶榕的果实,属于种子的潜在传播者,这对于城市绿地中的小叶榕种群的扩散和更新具有重要作用。

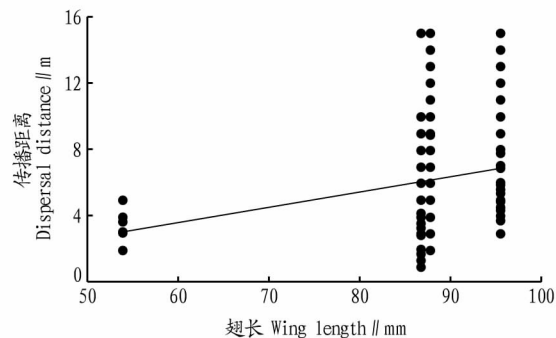


Fig. 3 Relationship between seed dispersal distance and body length(a) and wing length(b) of birds

鸟类的取食行为会影响鸟类对果实的取食量<sup>[24]</sup>。该研究中,鸟类访问只数对果实取食量的影响最大,且鸟类访问只数和果实取食量间存在明显的正相关,说明果实的取食量随着访问的鸟类只数的增加而增大。同时传播距离与体长呈极显著正相关,较大的体长意味着鸟类对能量的需求较高,加之其较大的消化容量能使种子具有较长的滞留时间,从而能将种子传播到更远的地方。其他研究也表明,传播距离随着鸟类体长的增加而增加<sup>[8]</sup>。此外,传播距离还与鸟类的翅长呈极显著正相关。翅长越大意味着鸟类对不同类型的森林适应性和飞行能力越强<sup>[24]</sup>,从而能将种子传播到不同类型的生境中。

#### 参考文献

[1] 王玲,丁志锋,胡君梅,等. 广州城市绿地中鸟类对食源树种的偏好

[J]. 四川动物,2016,35(6):838-844.

[2] 何海燕,王楠,董路. 北京城市鸟类对食源植物利用规律[J]. 动物学杂志,2021,56(4):491-499.

[3] GODÍNEZ-ALVAREZ H, RÍOS-CASANOVA L, PECO B. Are large frugivorous birds better seed dispersers than medium- and small-sized ones? effect of body mass on seed dispersal effectiveness[J]. Ecology and evolution, 2020, 10(12):6136-6143.

[4] SAAVEDRA F, HENSEN I, BECK S G, et al. Functional importance of avian seed dispersers changes in response to human-induced forest edges in tropical seed-dispersal networks[J]. Oecologia, 2014, 176(3):837-848.

[5] SPERRY J H, O'HEARN D, DRAKE D R, et al. Fruit and seed traits of native and invasive plant species in Hawaii: Implications for seed dispersal by non-native birds[J]. Biological invasions, 2021, 23(6):1819-1835.

[6] FARWIG N, SCHABO D G, ALBRECHT J. Trait-associated loss of frugivores in fragmented forest does not affect seed removal rates[J]. Journal of ecology, 2017, 105(1):20-28.

(下转第 63 页)

- [18] 顾燕青, 顾优丽, 白倩, 等. 杭州市菜地蔬菜对土壤重金属的富集特性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4): 401-410.
- [19] 王玉洁, 朱维琴, 金俊, 等. 杭州市农田蔬菜中 Cu、Zn 和 Pb 污染评价及富集特性研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2010, 9(1): 65-70.
- [20] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 土壤环境: HJ 694—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [21] 李家熙, 何红蓼, 周金生, 等. 岩石矿物分析[M]. 4 版. 北京: 地质出版社, 2011.
- [22] 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [23] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [24] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3845-3853.
- [25] 肖细元, 杨森, 郭朝晖, 等. 改良剂对污染土壤上蔬菜生长及吸收重金属的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 41-46.
- [26] 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 等. 硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2927-2935.
- [27] 韩明珠, 祖艳群, 李元, 等. 不同施氮水平对丘北辣椒生长、产量及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(S1): 32-35.
- [28] 王丹丹, 李辉信, 魏正贵, 等. 蚯蚓对污染土壤中黑麦草和印度芥菜吸收累积锌的影响[J]. 土壤, 2008, 40(1): 73-77.
- [29] 黄闰, 孟桂元, 陈跃进, 等. 苈麻对重金属铅耐受性及其修复铅污染土壤潜力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 148-152.
- [30] 于彩莲, 杨莹, 李晓霞, 等. 生长调节剂强化龙葵修复高 Cd 污染土壤[J]. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(3): 1-5.
- [31] 李贺. 不同农艺措施对黑麦草、地肤、遏蓝菜修复 Cd 污染土壤的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [32] 郭晓宏, 朱广龙, 魏学智. 5 种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 183-186.
- [33] 刘卫敏. 重金属污染土壤的植物-微生物-土壤改良的联合修复技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [34] SUN Z, CHEN J J, WANG X W, et al. Heavy metal accumulation in native plants at a metallurgy waste site in rural areas of Northern China[J]. Ecological engineering, 2016, 86: 60-68.
- [35] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3595-3600.
- [36] GOMEZ-ROS J M, GARCIA G, PEÑAS J M. Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión[J]. Ecological engineering, 2013, 57: 393-402.
- [37] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65-72.
- [38] 熊云武, 唐彪, 林晓燕, 等. 湘西锰矿区土壤重金属含量及优势植物吸收特征[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(8): 84-87, 95.
- [39] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2021-2027.
- [40] BARRUTIA O, ARTETXE U, HERNÁNDEZ A, et al. Native plant communities in an abandoned Pb-Zn mining area of Northern Spain: Implications for phytoremediation and germplasm preservation[J]. International journal of phytoremediation, 2011, 13(3): 256-270.
- [41] JUÁREZ-SANTILLÁN L F, LUCHO-CONSTANTINO C A, VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ G A, et al. Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico[J]. Bioresource technology, 2010, 101(15): 5836-5841.
- [42] 路畅, 王英辉, 杨进文. 广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1471-1475.
- [43] PUNZ W F, SIEGHARDT H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals[J]. Environmental & experimental botany, 1993, 33(1): 85-98.
- [44] PEÑEZ-ESTEBAN J, ESCOLÁSTICO C, RUIZ-FERNÁNDEZ J, et al. Bioavailability and extraction of heavy metals from contaminated soil by *Atriplex halimus*[J]. Environmental and experimental botany, 2013, 88: 53-59.
- [45] 陈友媛, 卢爽, 惠红霞, 等. 印度芥菜和香根草对 Pb 污染土壤的修复效能及作用途径[J]. 环境科学研究, 2017, 30(9): 1365-1372.
- [46] 任志盛, 刘数华. 重金属污染土壤修复研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 2042-2051.
- [47] 王璐, 陈功锡, 杨胜香, 等. 汞污染土壤植物修复研究现状与展望[J]. 地球与环境, 2022, 50(5): 754-766.
- [48] ZAPRĀNOVA P S, ANGELOVA V R, IVANOV K I. Evaluation of heavy metal availability in the mining areas of Bulgaria[M]//CALABRESE E J, KOSTECKI P T, DRAGUN J. Contaminated soils, sediments and water: Volume 10. Boston, MA: Springer-Verlag, 2006: 53-68.
- [49] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.
- [50] 杨伟龙, 白宇明, 李永利, 等. 内蒙古包头某铁矿尾矿库生态恢复的植物优选研究[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 683-694.
- [51] 苟体忠, 宋伟, 严红光. 丹寨汞(金)矿区 11 种本地植物的重金属富集特征[J]. 生物学杂志, 2021, 38(1): 72-76.
- [52] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1888-1900.
- [53] 李斌. 小秦岭典型地段植物重金属污染特征分析[J]. 黄金, 2016, 37(9): 72-76.
- [54] 高陈玺, 李川, 彭娟, 等. 湘南锰矿废弃地重金属污染土壤的研究及评价[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2013, 30(8): 78-83.

(上接第 55 页)

- [7] CAMARGO P H S A, PIZO M A, BRANCALION P H S, et al. Fruit traits of pioneer trees structure seed dispersal across distances on tropical deforested landscapes: Implications for restoration[J]. Journal of applied ecology, 2020, 57(12): 2329-2339.
- [8] MUÑOZ M C, SCHAEFER H M, BÖHNING-GAESE K, et al. Importance of animal and plant traits for fruit removal and seedling recruitment in a tropical forest[J]. Oikos, 2017, 126(6): 823-832.
- [9] 陆彩虹, 鲁长虎. 南京中山植物园鸟类对香樟果实(种子)的取食[J]. 动物学杂志, 2019, 54(6): 784-792.
- [10] CORLETT R T. Frugivory and seed dispersal by vertebrates in tropical and subtropical Asia: An update[J]. Global ecology and conservation, 2017, 11: 1-22.
- [11] 张帅, 范月峥, 王征. 福建梅花山自然保护区南方红豆杉母树特征对访间鸟类多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2657-2662.
- [12] DUAN Q, GOODALE E, QUAN R C. Bird fruit preferences match the frequency of fruit colours in tropical Asia[J]. Scientific reports, 2014, 4: 1-8.
- [13] 彭维新, 庄玉婷, 梁智洪, 等. 小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1707-1717.
- [14] WANG G H, YANG Z X, CHEN P, et al. Seed dispersal of an endangered *Kmeria septentrionalis* by frugivorous birds in a karst habitat[J]. Pakistan journal of zoology, 2019, 51(3): 1195-1198.
- [15] 潘扬, 徐丹, 鲁长虎, 等. 食果鸟类对红楠种子的传播作用[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 63-67.
- [16] 李宁, 王征, 鲁长虎, 等. 斑块生境中食果鸟类对南方红豆杉种子的取食和传播[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1681-1689.
- [17] BREITBACH N, LAUBE I, STEFFAN-DEWENTER I, et al. Bird diversity and seed dispersal along a human land-use gradient: High seed removal in structurally simple farmland[J]. Oecologia, 2010, 162(4): 965-976.
- [18] 赵正阶. 中国鸟类志[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
- [19] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing[M]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2019.
- [20] SCHAEFER H M, MCGRAW K, CATONI C. Birds use fruit colour as honest signal of dietary antioxidant rewards[J]. Functional ecology, 2008, 22(2): 303-310.
- [21] RODRÍGUEZ A, ALQUÉZAR B, PEÑA L. Fruit aromas in mature fleshy fruits as signals of readiness for predation and seed dispersal[J]. New phytologist, 2013, 197(1): 36-48.
- [22] JORDANO P, GARCÍA C, GODOY J A, et al. Differential contribution of frugivores to complex seed dispersal patterns[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2007, 104(9): 3278-3282.
- [23] GARCÍA-RODRÍGUEZ A, ALBRECHT J, FARWIG N, et al. Functional complementarity of seed dispersal services provided by birds and mammals in an alpine ecosystem[J]. Journal of ecology, 2021, 110(1): 232-247.
- [24] LI N, WANG Z, LI X H, et al. Bird functional traits affect seed dispersal patterns of China's endangered trees across different disturbed habitats[J]. Avian research, 2018, 9: 1-6.