



刘鹤佳, 张鑫, 马德英, 吕昭智. 荒山绿化对野生新疆郁金香传粉昆虫多样性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (3): 586–594.

荒山绿化对野生新疆郁金香传粉昆虫多样性的影响

刘鹤佳^{1,2}, 张鑫^{2,3,4}, 马德英^{1*}, 吕昭智^{2,5*}

(1. 新疆农业大学农学院, 农林有害生物监测与安全防控重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所标本馆, 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 青岛农业大学植物医学学院, 青岛 266109)

摘要: 为探究荒山绿化模式下对野生新疆郁金香 *Tulipa sinkiangensis* 传粉昆虫多样性的影响, 选取乌鲁木齐市雅玛里克山设置长期绿化区、短期绿化区和自然生境 3 个环境梯度, 采取样线和样方调查等方法进行新疆郁金香传粉昆虫多样性的研究。共收集传粉昆虫共 316 头, 隶属 17 科 23 属 36 种, 优势种为黑腹膝芒寄蝇 *Gonia picea*。不同绿化梯度下物种丰富度指数相似, 但随着荒山绿化进程的推进传粉昆虫多样性指数、均匀度指数呈下降趋势, 自然生境最高 (2.719; 0.941), 长期绿化区最低 (1.299 ± 0.311; 0.553 ± 0.076)。长期绿化区和短期绿化区之间物种组成极不相似; 长期绿化区和自然生境以及短期绿化区和自然生境之间物种组成均为中等不相似。同时发现, 树木胸径对传粉昆虫多样性具有显著负面影响 ($P=0.047$)。研究表明, 未来荒山绿化工程应提高生态异质性, 避免大片纯林的单一种植模式。

关键词: 荒山绿化; 新疆郁金香; 传粉昆虫多样性

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2023) 03-0586-09

Effect of afforestation on the diversity of pollinators associated with *Tulipa sinkiangensis*

LIU He-Jia^{1,2}, ZHANG Xin^{2,3,4}, MA De-Ying^{1*}, LV Zhao-Zhi^{2,5*} (1. Key Laboratory of the Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests, College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. The Specimen Museum of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Plant and Health, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to study the effect of afforestation on the diversity of pollinator insects associated with *Tulipa sinkiangensis*. Three afforestation gradients (Long-term afforestation; Short-term afforestation; Natural habitat) were set up in Yamalike Mountain of Urumchi, transects and quadrats were used to collect and investigate pollinator insects among three afforestation gradients in Yamalike Mountain during the florescence of *T. sinkiangensis*. As a result, a total of 316 species of pollinator insects were collected and

基金项目: 国家自然科学基金 (31901128); 中国科学院“西部之光: 西部青年学者”项目 (2018-XBQNXZ-B-019); 新疆生产建设兵团科技攻关项目 (2019AB023)

作者简介: 刘鹤佳, 女, 1996 年生, 黑龙江省人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫生态, E-mail: liuhejiaxn@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 马德英, 女, 博士, 教授, 研究方向为有害生物绿色防控, E-mail: mdyxnd@163.com; 吕昭智, 男, 博士, 研究员, 研究方向为昆虫生态, E-mail: zhaozhi_lv@sina.com

收稿日期 Received: 2022-01-12; 接受日期 Accepted: 2022-06-09

identified, which belong to 23 genera and 17 families. The dominant species is *Gonia picea*. The results showed that species richness were similar among three gradients, but Shannon-Wiener index and Pielou index decrease as the afforestation progress advances. The natural habitats showed the highest pollinator diversity and evenness (2.719; 0.941), while the long-term afforestation areas showed the lowest (1.299 ± 0.311 ; 0.553 ± 0.076). Pollinator species composition showed low similarity at different afforestation gradients, with long-term afforestation areas being extremely dissimilar to short-term afforestation areas, and moderate dissimilarity among other gradients. A significant negative effect of tree diameter at breast height on the diversity of pollinators was detected by GLM analysis, which indicated the advance of afforestation process was the most influential factors. Future afforestation projects should consider ecological heterogeneity, avoid monoculture afforestation pattern.

Key words: Afforestation; *Tulipa sinkiangensis*; pollinators; species richness

以膜翅目 Hymenoptera、鳞翅目 Lepidoptera 为代表的传粉昆虫是自然界生物系统的重要组成部分,对维持生物多样性、生态系统平衡有着重要意义(刘秀薇等,2018)。数据表明世界 80% 被子植物、35% 的粮食作物通过传粉昆虫进行生产(钦俊德,1985;徐环李等,2009),传粉昆虫多样性的下降将直接影响植物授粉。同时,传粉昆虫具有对环境依赖性高、对环境变化敏感等特点,因此可以作为优秀的环境监测指示生物(杨萍等,2005)。然而,在土地过度开垦、土地利用类型的改变、化学农药的滥用等种种因素作用下(钦俊德,1985;Kearns *et al.*,1998),全球范围内传粉昆虫多样性呈下降趋势(王琳等,2009),已严重威胁生物多样性的完整性。Kremen 等(2002)研究发现由于病虫害、农药等因素的影响,意大利蜂 *Apis mellifera* 数量在不断减少,影响农作物和果树的授粉,致使作物减产。同时,生境局部特征的变化影响传粉昆虫的种群结构(陈振宁等,2006)。Britta 等(2021)研究发现不同景观尺度的环境变化和景观破碎化影响传粉昆虫种群多样性。随着城镇建设、荒山绿化的进展,植物群落时刻受到人为干扰的影响(叶林奇,2000)。近几年来,人为干扰在自然界和生态系统中的作用越来越明显(方茹意等,2017),其对生物群落的影响远超其他环境因子(董世魁和胡自治,2000)。人为干扰可通过改变群落内的环境条件、物种组成和多样性等,改变群落的结构和功能及其多样性的组成,影响群落的演替过程(刘志民,2002;姚俊宇等,2018;曾洪等,2021)。

乌鲁木齐市(以下简称乌市)地处亚欧大陆腹地,属于典型的温带大陆性气候,全年干旱少雨,周边荒山资源丰富(黄湘等,2003;李珍珍,

2013)。雅玛里克山(以下简称雅山)作为乌市西侧面积最大的荒山,自然植被相对稀少、地表裸露(朱淳海,2013;孙剑,2015),自 1996 年启动雅山荒山绿化工程以来(朱淳海,2013),绿化面积逐年增加。雅山主要以榆树 *Ulmus pumila*、小叶白蜡 *Fraxinus bungeana*、紫穗槐 *Amorpha fruticosa* 等作为其主要绿化树种(董琪和张艳敏,2010),一定程度上改善了乌市的生态环境。而雅山具有丰富的以灌木、草本为主的荒漠植被资源共计 37 科 147 属 223 种,其中多年生早春短命植物占雅山全部植物的 13.5% (叶卫英等,2005)。其中不乏一些本土特色早春短命荒漠植物,如新疆郁金香 *Tulipa sinkiangensis*,准噶尔鸢尾蒜 *Ixiolirion songaricum*。

新疆郁金香 *Tulipa sinkiangensis*,属百合科 Liliaceae 郁金香属 *Tulipa* L.,是天山北麓形成的特有种,2021 年已被列入国家二级重点保护植物(国家林业局,2021),其主要分布区位于新疆乌鲁木齐、奎屯、玛纳斯等海拔高度 700 ~ 1 300 m 的荒漠地区(毛祖美,1984)。新疆郁金香具卵圆形鳞茎器官且植株矮小,属早春短命植物,生长周期不足两月,利用早春降水或融雪生长发育,三月底到四月初萌芽,四月上旬开花,完成授粉果实成熟,随即进入夏季休眠。雅山是乌市周边新疆郁金香的重要分布区之一。但随着城市发展荒山绿化的进程逐渐推进,新疆郁金香所生长的荒山生境受到人为干扰影响,自然植物群落及依赖于植物群落的传粉昆虫多样性也将因此受到影响,但荒山绿化进程的推进对新疆郁金香传粉昆虫多样性的影响程度如何尚没有系统的研究。

目前,为中亚干旱区典型早春短命植物新疆郁金香进行传粉的传粉昆虫多样性调查较少,不

同环境因子作用下新疆郁金香传粉昆虫多样性变化趋势尚缺乏深入研究。为了调查新疆郁金香传粉昆虫的多样性组成,探究荒山绿化进程对野生新疆郁金香传粉昆虫多样性的影响,本研究在荒山绿化持续推进的背景下,对新疆郁金香的传粉昆虫多样性进行调查,研究荒山绿化进程对其造成的影响,揭示不同环境因子的贡献度,为未来评估荒山绿化工程推进下待绿化区域的生态价值、本土特色荒漠生物对荒山绿化做出的响应等提供数据参考,也为未来乌鲁木齐市及新疆荒山绿化工程的可持续发展、生态文明建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于雅玛里克山 ($43^{\circ}45'44'' \sim 43^{\circ}47'25''$ N, $87^{\circ}33'15'' \sim 87^{\circ}34'56''$ E), 位于乌鲁木齐市沙依巴克区, 顶峰海拔高度 1 391 m。年均气温 7.6°C , 平均降水量 266.9 mm, 年蒸发量 2 731 mm。温差大, 降水少, 蒸发量大, 春秋湿润, 夏季干旱、热量充沛, 冬季寒冷, 属于典型的温带大陆性气候(许刚和刘方源, 2007)。雅山山体主要由二叠纪湖泊、河流相灰色砾石层和亚砂土或亚黏土互层组成, 土壤发育薄弱, 土壤类型主要为碱性栗钙土和棕钙土(张慧文等, 2008); 土壤有机质含量较低, 矿质元素丰富(许刚和刘方源, 2007; 吾玛尔·阿布力孜等, 2013)。雅山地下水系深埋, 大气降水稀少、蒸发量大, 造成雅山自然植被主要以荒漠植被为主, 以藜科、菊科、禾本科、豆科、十字花科占主要优势(叶卫英等, 2005)。截止 2017 年, 雅山绿化面积达 1 766 ha。

1.2 样地设置及调查时间

为了研究不同绿化进程对新疆郁金香传粉昆虫多样性的影响, 在雅山设置了 3 个环境梯度, 包括自然生境(原始生境, 未经绿化的自然植被区)、短期绿化区(经过不足 5 年人工绿化, 但仍保留部分自然植被的区域)、长期绿化区(经过 5 年及以上人工绿化, 已完全进行绿化的区域)。每个环境梯度设置 3 个相距 2 000 m 的样地作为重复, 每个样地设置 3 条样线, 每条样线长 200 m, 样线间隔 1 000 m。共计样线 27 条。于 2021 年新疆郁金香的生长周期 4 月 8 日 - 5 月 10 日对植物群落和传粉昆虫进行调查。

1.3 数据采集

1.3.1 植物群落调查

每条样线设置 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 标准样方 5 个。记录样方中地表植物的种类、平均植物群落高度、盖度、蜜源丰富度等信息; 以样线中心点为基准设立半径 100 m 的圆形取样点, 以五点取样法调查取样点内绿化乔、灌木的种类、胸径等信息。

在每条样线上随机选取 3 处具有新疆郁金香的样方, 记录新疆郁金香开花数并做标记, 于 5 月中旬重复调查, 记录新疆郁金香结果数。

1.3.2 新疆郁金香传粉昆虫调查

(1) 每周调查 1 次, 于调查日的 10:00 - 16:00 进行, 遇阴雨天气则顺延一日, 每条样线共采样 4 次。使用直径 60 cm, 网杆长 2.5 m 的标准捕虫网延样线缓慢前进, 采集正在新疆郁金香花上进行授粉的传粉昆虫。依据传粉昆虫类群的不同采用相应的保存方法, 鳞翅目昆虫存放于三角袋中, 膜翅目、双翅目及其他传粉昆虫保存在装有 95% 酒精棉球的 50 mL 离心管中, 带回实验室在体视显微镜(尼康 SMZ745T) 下对昆虫样本体表的传粉昆虫花粉粒进行镜检, 去除体表不携带花粉粒的昆虫样本后, 将剩余昆虫样本通过查阅文献进行分类鉴定、统计(吴燕如, 1965; 周尧, 1998; 周尧, 1999; 吴燕如, 2000; 胡红英, 2012)。

(2) 调查过程中通过新疆郁金香传粉昆虫出现在样线的次数, 统计新疆郁金香传粉昆虫的出现率。

1.4 数据处理

(1) 用不同生境区域类型中的物种数量来表示物种丰富度 S ;

(2) Shannon-Wiener 多样性指数进行物种多样性分析;

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

其中 $P_i = N_i/N$, 为第 i 个物种个体数占种群中总个体数的比例, N_i 为第 i 个物种的数量, N 为种群个体总数。

(3) Pielou 均匀度指数进行物种均匀度分析;

$$J' = H'/\ln S$$

其中, H' 为 Shannon 多样性指数, S 为物种数。

(4) Jaccard 相似性系数进行物种组成相似性分析;

$$C_s = c/(a + b - c)$$

其中, c 为两种生境类型的共同物种数, a 和 b 分别为生境类型 A 和生境类型 B 的物种数。

(5) 使用 R 4.1.0 及其功能包 (multcomp, lme4) 对数据进行统计分析, 其中, 单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对不同绿化程度之间的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数进行对比, Tukey test 进行具体差异样本分析。使用广义线性模型 (Generalized linear model, 以下简称 GLM) 分析各种环境因子在 3 种绿化梯度下的影响力, 选取 3 个景观尺度中新疆郁金香传粉昆虫多样性指数作为应变量, 样方法收集的环境因子数据作为自变量 (草本植物物种数、草本植物平均群落高度、木本植物胸径、蜜源丰富度等级、裸地面积、绿化类型), 为避免多重共线性, 对所有自变量进行 Pearson 相关性检测, 移除 Pearson 相关性系数大于 0.5 的因子, 选择高斯分布作为误差分布模式进行建模。通过赤池信息量准则 (Akaike Information Criterion, 以下简称 AIC) 比较筛选出各景观尺度下 AIC 最小模型作为最优模型,

选择 $\Delta AIC < 2$ 的模型进行模型平均, 确定对传粉昆虫多样性解释力最强的环境因子。

2 结果与分析

2.1 雅玛里克山新疆郁金香发生情况及传粉昆虫种类和数量组成

通过植物群落调查结果发现, 新疆郁金香盖度、出现样方数随着雅山荒山绿化进程的推进, 呈降低趋势, 并在长期绿化区达到最低。根据新疆郁金香结实率结果可看出, 雅山自然生境中新疆郁金香结实率最高, 见表 1。

2021 年 4 月 8 日 - 5 月 10 日共计收集到新疆郁金香传粉昆虫 316 头, 经鉴定采集的传粉昆虫标本隶属 17 科 23 属 36 种。其中膜翅目 17 种, 双翅目 10 种, 鳞翅目 4 种, 鞘翅目 4 种, 半翅目 1 种, 见图 1。其中优势种为黑腹膝芒寄蝇 *Gonia picea*, 并发现黑腹膝芒寄蝇多发生于长期绿化区, 见表 2。

表 1 雅玛里克山新疆郁金香发生情况

Table 1 Occurrence of *Tulipa sinkiangensis* in Yamalike Mountain

	新疆郁金香出现样方数 Occurrence plots of <i>T. sinkiangensis</i>	新疆郁金香盖度 Cover of <i>T. sinkiangensis</i>	结实率 Seed setting rate
自然生境 Natural habitat	9	0.053 ± 0.024	0.693 ± 0.136
短期绿化区 Short-term afforestation	8	0.050 ± 0.015	0.322 ± 0.106
长期绿化区 Long-term afforestation	3	0.030 ± 0.030	0.499 ± 0.216

表 2 雅玛里克山新疆郁金香个体数前五的传粉昆虫出现频率

Table 2 Occurrence rate of top five pollinators of *Tulipa sinkiangensis* in Yamalike Mountain

出现率 Occurrence rate	绿化梯度 Afforestation gradients		
	自然生境 Natural habitat	短期绿化区 Short-term afforestation	长期绿化区 Long-term afforestation
物种 Species			
黑腹膝芒寄蝇 <i>Gonia picea</i>	0.125 ± 0.125	0.583 ± 0.083	1.000 ± 0.00
金黄地蜂 <i>Andrena chrysopeya</i>	0.250 ± 0.000	0.167 ± 0.083	0.417 ± 0.083
细腹食蚜蝇属 <i>Sphaerophoria</i>	0.375 ± 0.125	0.00	0.083 ± 0.083
孕地蜂 <i>Andrena gravida</i>	0.125 ± 0.125	0.167 ± 0.083	0.250 ± 0.144
菜粉蝶 <i>Pieris rapae</i>	0.125 ± 0.125	0.583 ± 0.083	0.333 ± 0.083

2.2 雅山不同绿化梯度下新疆郁金香传粉昆虫多样性分析

2.2.1 物种丰富度

新疆郁金香传粉昆虫物种丰富度指数在 3 种

环境梯度下分别为 20、20、19, 丰富度指数相似。

2.2.2 Shannon-Wiener 多样性指数

不同环境梯度下, 随着荒山绿化进程的推进, 新疆郁金香传粉昆虫多样性指数呈下降趋势。不

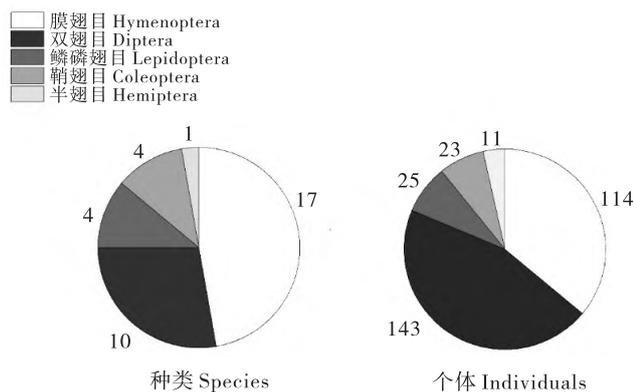


图1 雅玛里克山新疆郁金香传粉昆虫种类及数量

Fig. 1 Species richness and individuals of pollinators of *Tulipa sinkiangensis* in Yamalike Mountain

同绿化梯度下 Shannon-Wiener 多样性指数总体均值存在一定的差异,但未达到显著水平 ($F = 6.30$, $P = 0.058$) (见图2)。

2.2.3 Pielou 均匀度指数

不同环境梯度下,随着荒山绿化进程的推进,新疆郁金香传粉昆虫均匀度指数呈下降趋势,不同绿化梯度下 Pielou 均匀度指数存在显著差异 ($F = 10.23$, $P = 0.026$)。差异分析显示长期绿化区与短期绿化区存在显著差异 ($q = 5.51$, $P = 0.038$, Tukey test)、与自然生境之间有一定程度的差异但不显著 ($q = 4.98$, $P = 0.052$, Tukey

test),短期绿化区与自然生境之间差异不显著 ($q = 1.09$, $P = 0.739$, Tukey test) (见图2)。

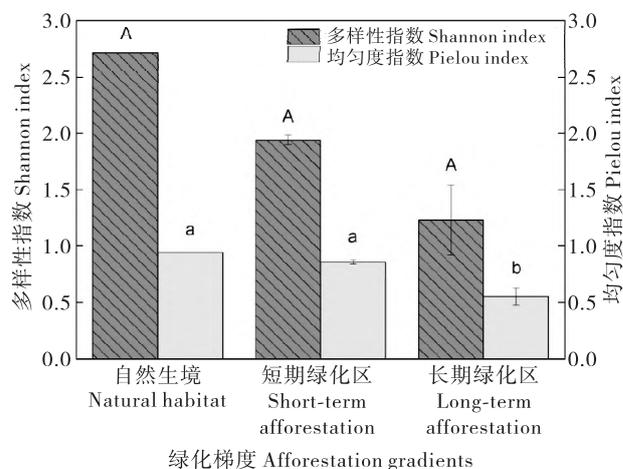


图2 雅玛里克山不同绿化梯度下新疆郁金香传粉昆虫多样性指数、均匀度指数

Fig. 2 Shannon and Pielou index of pollinator of *Tulipa sinkiangensis* under different afforestation gradients in Yamalike Mountain

2.2.4 物种组成 Jaccard 相似性系数

新疆郁金香的传粉昆虫物种组成在不同绿化程度下相似性系数较低,长期绿化区和短期绿化区之间极不相似;长期绿化区和自然生境以及短期绿化区和自然生境之间均为中等不相似(表3)。

表3 雅玛里克山不同绿化梯度下新疆郁金香传粉昆虫 Jaccard 相似性系数

Table 3 Jaccard similarity coefficient of pollinators of *Tulipa sinkiangensis* under different afforestation gradients in Yamalike Mountain

绿化梯度 Afforestation gradients	相似性系数 Similarity coefficient		
	长期绿化区 Long-term afforestation	短期绿化区 Short-term afforestation	自然生境 Natural habitat
长期绿化区 Long-term afforestation	-	0.212	0.258
短期绿化区 Short-term afforestation	0.212	-	0.444
自然生境 Natural habitat	0.258	0.444	-

注: Jaccard 相似性系数 C_s 为 0.00 ~ 0.25 为极不相似, C_s 为 0.25 ~ 0.50 为中等不相似, C_s 为 0.50 ~ 0.75 为中等相似, C_s 为 0.75 ~ 1.00 时为极相似。Note: Jaccard similarity coefficient C_s 0.00 ~ 0.25 was extremely dissimilar, C_s 0.25 ~ 0.50 was moderate dissimilarity, C_s 0.50 ~ 0.75 was moderate similarity, and C_s 0.75 ~ 1.00 was extremely similar.

2.3 雅山新疆郁金香传粉昆虫多样性的主要影响因素

为避免多重共线性,移除了 Pearson 相关性系数大于 0.5 的因子(平均植物群落高度、裸地面积)。对传粉昆虫多样性和影响因子(新疆郁金香

盖度、草本植物物种数、蜜源植物丰富度、树木胸径)建模分析,筛选出最高解释力的模型 ($\Delta AIC < 2$),结果见表4,其中最优模型为模型4(树木胸径+蜜源丰富度等级)。

树木胸径对新疆郁金香传粉昆虫的多样性起

显著的负面效果 ($P = 0.047$), 而蜜源丰富度等级、新疆郁金香盖度和草本植物的物种数均对传粉昆虫多样性起正面效果, 蜜源丰富度等级、新

疆郁金香盖度、植物物种数对传粉昆虫多样性的影响力低于树木胸径 (表 5)。

表 4 新疆郁金香传粉昆虫多样性模型分析

Table 4 Model analysis of the pollinators diversity of *Tulipa sinkiangensis*

模型 编号 Models	效果系数 Coefficient estimates				赤池信息 量准则 AIC	赤池信息量 准则差异量 ΔAIC	模型 权重 Weight
	树木胸径 Tree DBH	蜜源丰富度等级 Nectar richness index	新疆郁金香盖度 Cover of <i>Tulipa</i> <i>sinkiangensis</i>	草本植物物种数 Herbal plant species richness			
4	-0.403	0.272	-	-	4.5	0.00	0.285
6	-0.420	-	0.252	-	5.4	0.88	0.183
8	-0.382	0.185	0.130	-	5.4	0.90	0.182
12	-0.402	0.275	-	0.008	6.5	1.99	0.105
1	-	-	-	-	16.5	11.97	0.001

注：“-”表示未参与模型组合的环境因子。Note：“-” meant factors not included in the corresponding models.

表 5 新疆郁金香传粉昆虫多样性影响因子分析

Table 5 Effect of factors on the pollinators diversity of *Tulipa sinkiangensis*

影响因子 Impact factors	z 值	P
树木胸径 Tree DBH	1.985	0.047
蜜源丰富度等级 Nectar richness index	1.019	0.308
新疆郁金香盖度 Cover of <i>Tulipa sinkiangensis</i>	0.752	0.452
植物物种数 Herbal plant species richness	0.040	0.968

3 结论与讨论

物种多样性是研究物种群落组成、群落时空变化规律的重要指标 (王继丰等, 2017), 生境质量及其变化趋势将直接反应于以膜翅目、鳞翅目为代表的传粉昆虫群落组成、群落结构变化 (张立微, 2016), 研究发现蝴蝶以寄主为中心分布, 所处生境越复杂其物种多样性越高 (刘艳梅, 2008)。同时研究发现, 生境保存越完整, 即使长期受人为干扰的影响, 蝶类生物多样性仍可以维持较高水平 (刘建文, 2003)。雅山随着荒山绿化进程的推进, 生境的变化, 影响着传粉昆虫的多

样性组成。但目前对于新疆郁金香传粉昆虫多样性的研究较少, 仅在艾沙江·阿不都沙拉木等 (2013) 研究伊犁郁金香 *Tulipa iliensis* 的传粉昆虫中仅发现菜粉蝶 *Pieris rapae*、意大利蜂 *Apis mellifera*、荨麻蛱蝶 *Aglais urticae*、六显甜花蜂 *Halictus sexnotatulus* 4 种传粉昆虫, 其中意蜂、菜粉蝶为伊犁郁金香主要传粉昆虫。本研究中共发现新疆郁金香传粉昆虫包括膜翅目、双翅目、鳞翅目、鞘翅目、半翅目, 共 17 科 23 属 36 种, 其中主要优势种是在长期绿化区中出现率及个体数量均最多的黑腹膝芒寄蝇 *Gonia picea*。可能是由于长期绿化区林下禾本科植物丰富、取食其根部的鳞翅目夜蛾科地下害虫资源较多, 为黑腹膝芒寄蝇提供了充足寄主资源 (侯鹏, 2014)。通过新疆郁金香盖度和样方发生数可以知道, 新疆郁金香仍广泛存在于自然生境或人为干扰程度仍较低水平的短期绿化区中, 同时自然生境中具有最高的新疆郁金香结实率, 而长期绿化区新疆郁金香结实率高于短期绿化区, 可能是由于长期绿化区是经过 5 年或以上绿化的成熟区域, 林下耐阴开花植物较短期绿化区更为丰富, 增加了部分非专性传粉者短期内可为新疆郁金香传粉。

在长期绿化区、短期绿化区以及自然生境这 3 个环境梯度中, 传粉昆虫物种丰富度指数相似, 但传粉昆虫物种组成相似性系数在不同尺度之间都呈较低水平, 其中长期绿化区和短期绿化区之

间为极不相似, 长期绿化区和自然生境以及短期绿化区和自然生境之间为中等不相似。说明雅山荒山绿化时间的长短对于新疆郁金香传粉昆虫的物种组成的影响较大。新疆郁金香作为早春短命植物, 具有耐寒、避高温、喜光热的特点 (梅莉娟, 2006)。而随着人工绿化时间的增长, 林下土壤、空气的湿度与林下郁闭度随之增大 (王媚臻等, 2019), 使得喜光热、干燥的雅山本土荒漠植物群落无法适应, 可林下良好的水分、土壤条件却利于一些耐阴植被的生长 (李金金等, 2020), 使得植物群落构成发生了变化, 其传粉昆虫的物种组成也随之变化 (Biesmeijer *et al.*, 2006)。

不同绿化梯度下, 香浓多样性指数随荒山绿化进程推进, 呈现明显降低的趋势。与“中度干扰假说” (IDH) (Connell, 1978; 姚小兰等, 2017) 中多样性指数随着人为干扰呈先增后降的趋势不符。可能是因为新疆郁金香是多年生早春短命植物, 依存于相对脆弱的干旱区荒漠环境, 抗干扰能力较弱, 而绿化进程的推进使得到达地面的光照强度减弱 (李双喜等, 2009), 林间空气湿度增加 (彭萍等, 2004), 原有的传粉昆虫群落所依存的生境遭到破坏, 无法适应新环境, 只能被新的传粉昆虫群落相继取代。有研究表明纯林大范围的建立无法达到自然生境中的生物多样性水平 (Hua *et al.*, 2016), 对于传粉昆虫而言, 生境破碎化和栖息地丧失带来的影响更为强烈, 干扰后新增的蜜源不足以弥补栖息地改变造成的损失 (Fahrig *et al.*, 2015)。雅山绿化工程选取的种植模式结构相对单一、层次相对简单, 荒山绿化改造后短期内无法恢复原有生境, 导致雅山生物多样性降低, 传粉昆虫多样性维持在较低水平。也有学者认为, 中度干扰假说仅适应于自然干扰, 并不适用于荒山绿化这一人为干扰环境 (Nordin *et al.*, 2009), 因此本研究结论与“中度干扰假说”存在一定差异。

不同绿化梯度下, 均匀度指数随着荒山绿化进程的增加, 呈现下降趋势。是由于长期绿化区中存在优势种黑腹膝芒寄蝇 *Gonia picea*, 降低了长期绿化区的传粉昆虫均匀度。而短期绿化区和自然生境中植被覆盖率较低, 裸地面积较大, 地表土壤水分条件较差, 没有明显的优势传粉昆虫物种形成, 故均匀度相对较高。

GLM 分析结果显示新疆郁金香传粉昆虫的多样性主要受到 4 个因子的影响, 其中蜜源丰富度

等级、新疆郁金香盖度、草本植物物种数对新疆郁金香传粉昆虫多样性产生正面影响, 树木胸径对其多样性产生负面影响, 且树木胸径是传粉昆虫多样性的最主要的负面因子。树木胸径增加主要与林分密度、林下郁闭度等指标密切相关, 其通过影响林下光照、降水、土壤养分等条件造成林下环境及植物种类、数量分布上的差异 (何艺玲和傅懋毅, 2002)。随着荒山绿化年限的增加, 绿化区的树木胸径将逐渐增加, 其负面影响力也将逐渐增强, 不利于未来新疆郁金香的生长发育与其传粉昆虫的多样性。

上述结果表明, 随着荒山绿化进程的推进, 树木胸径的增加, 新疆郁金香的传粉昆虫多样性逐渐降低, 且物种组成出现改变, 这将对未来新疆郁金香的传粉和繁殖造成不利影响, 也对其保护工作提出挑战。荒山绿化不等于简单的植树造林, 未来新疆荒山绿化应与实际情况相结合, 科学精准的评估待绿化区域的生态价值, 合理进行荒山绿化规划及优化, 避免采用大片纯林的单一种植模式, 保留一定原始生境的同时提高生态异质性, 建立自然保留地为新疆郁金香及其传粉昆虫提供庇护所, 促进未来新疆荒山绿化工程的绿色可持续发展。

参考文献 (References)

- Abdusalam A. Reproductive Biology of *Tulipa iliensis* and Its Adaptive Strategies to the Early Spring Environment [D]. Xinjiang Agricultural University, 2013. [艾沙江·阿不都沙拉木. 伊犁郁金香的繁殖生物学特性及其生态适应对策 [D]. 新疆农业大学, 2013]
- Abliz W, Tusun A, Wu SL. Investigation on the community structure and diversity of soil fauna at the different altitudes of Yamalik Mountain in Urumqi [J]. *Life Science Research*, 2013, 17 (1): 47-56. [吾玛尔·阿布力孜, 阿布都如苏力·吐孙, 吴松林. 乌鲁木齐雅玛里克山土壤动物群落结构及其多样性研究 [J]. 生命科学研究, 2013, 17 (1): 47-56]
- Biesmeijer JC, Roberts SPM, Reemer M, *et al.* Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands [J]. *Science*, 2006, 313 (5785): 351-354.
- Chen JN, Zeng Y, Bao M, *et al.* Butterfly diversity in different habitat types at the Huzhu Northern Mountain National Forest Park, Qinghai [J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14 (6): 517-524. [陈振宁, 曾阳, 鲍敏, 等. 青海互助北山国家森林公园不同生境的蝶类多样性研究 [J]. 生物多样性, 2006, 14 (6): 517-524]
- Chou I. Classification and Identification of Chinese Butterflies [M]. Zhengzhou: Henan Scientific and Technological Publishing House, 1999. [周尧. 中国蝴蝶分类与鉴定 [M]. 郑州: 河南科学技

- 术出版社, 1998]
- Chou I. Monograph of Chinese Butterflies [M]. Zhengzhou: Henan Scientific and Technological Publishing House, 1999. [周尧. 中国蝶类志 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1999]
- Connell JH. Diversity in tropical rain forests and coral reefs [J]. *Science*, 1978, 199 (4335): 1302–1310.
- Dong Q, Zhang YM. Analysis on the current situation and suggestion of afforestation in Urumchi [J]. *Forestry of Xinjiang*, 2010, 5: 32–34. [董琪, 张艳敏. 乌鲁木齐市荒山绿化现状分析与发展建议 [J]. 新疆林业, 2010, 5: 32–34]
- Dong SH, Hu ZZ. Research advancement on the stability of artificial grassland and the mechanisms of its maintenance [J]. *Grassland and Turf*, 2000, 3: 3–8. [董世魁, 胡自治. 人工草地群落稳定性及其调控机制研究现状 [J]. 草原与草坪, 2000, 3: 3–8]
- Fahrig L, Girard J, Duro D, et al. Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 219–234.
- Fang RY, Wu W, Lu X, et al. Effects of different artificial disturbances intensities on plant diversity in Moso Bamboo Forest [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2017, 15 (6): 1–5. [方茹意, 吴炜, 鲁翔, 等. 不同强度人为干扰对毛竹林植物多样性的影响 [J]. 世界竹藤通讯, 2017, 15 (6): 1–5]
- Fang YH, Wang XY, Zheng XL, et al. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation programme [J]. *Nature Communications*, 2016, 7 (1): 12717.
- Hang X, Wu SL, Song Y, et al. Analysis on the current situation and suggestion of city afforestation in Urumchi [J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 23 (4): 43–47. [黄湘, 武胜利, 宋勇, 等. 乌鲁木齐市城市绿化现状分析与发展建议 [J]. 新疆师范大学学报 (自然科学版), 2003, 23 (4): 43–47]
- He YL, Fu MY. Review of studies on under storey of plantations [J]. *Forest Research*, 2002, 15 (6): 727–733. [何艺玲, 傅懋毅. 人工林林下植被的研究现状 [J]. 林业科学研究, 2002, 15 (6): 727–733]
- Hou P, Zeng G, Xu WJ, et al. Progress in systematic study of Goniini (Diptera, Tachinidae) [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 32 (2): 144–150. [侯鹏, 郑国, 许雯婧, 等. 膝芒寄蝇族昆虫 (双翅目: 寄蝇科) 研究进展 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2014, 32 (2): 144–150]
- Hu HY. Colored Pictorial Handbook of Insects in Xinjiang [M]. Urumchi: Xinjiang University Press, 2012. [胡红英. 新疆昆虫原色图鉴 [M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2012]
- Keams CA, Inouye DW, Waser NM. Endangered mutualisms: The conservation of plant-pollinator interactions [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29 (1): 82–112.
- Kremen C, Williams NM, Thorp RW. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99 (26): 16812–16816.
- Li JJ, Zhang J, Zhang AJ, et al. Understorey plant species diversity and allelochemicals in rhizosphere soils of eucalyptus grandis plantations with different densities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (7): 2175–2184. [李金山, 张健, 张阿娟, 等. 不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质 [J]. 应用生态学报, 2020, 31 (7): 2175–2184]
- Li SX, Zhu JJ, Zhang YL, et al. Diversity of understorey herbaceous species and canopy density of liriiodendron chinense stand [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25 (2): 20–24. [李双喜, 朱建军, 张银龙, 等. 人工马褂木林下草本植物物种多样性与林分郁闭度的关系 [J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25 (2): 20–24]
- Li ZZ. Study on Regional Characters of Barren Hills and Green in Urumqi [D]. Xinjiang Agricultural University, 2013. [李珍珍. 乌鲁木齐市荒山绿化的地域性特色研究 [D]. 新疆农业大学, 2013]
- Liu JW, Jiang GF. Faunal in Yuanbao Mountain nature reserve of Guangxi, China [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2003, 22 (3): 162–165. [刘建文, 蒋国芳. 广西元宝山自然保护区蝴蝶种类组成及垂直分布 [J]. 四川动物, 2003, 22 (3): 162–165]
- Liu XW, Chesters D, Wu CS, et al. A horizon scan of the impacts of environmental change on wild bees in China [J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26 (7): 760–765. [刘秀徽, Chesters D, 武春生, 等. 环境变化对中国野生蜜蜂多样性的影响 [J]. 生物多样性, 2018, 26 (7): 760–765]
- Liu YM, Yang HY. The butterfly diversity of different habitat types in Maijishan of Gansu [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2008, 45 (3): 456–469. [刘艳梅, 杨航宇. 麦积山风景区不同生境类型蝶类的多样性 [J]. 昆虫知识, 2008, 45 (3): 465–469]
- Liu ZM, Zhao XY, Liu XM. Relationship between disturbance and vegetation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11 (4): 1–9. [刘志民, 赵晓英, 刘新民. 干扰与植被的关系 [J]. 草业学报, 2002, 11 (4): 1–9]
- Mao ZM. Systematic study of *Tulipa* L. in Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 1984, 2: 39–43. [毛祖美. 新疆郁金香属植物的研究 [J]. 干旱区研究, 1984, 2: 39–43]
- Mei LJ. Phenological Characteristic on *Tulipa* from China and Its Morphological Differentiation of Populations [D]. Xinjiang Agricultural University, 2006. [梅莉娟. 中国郁金香属植物物候特征及居群形态分化 [D]. 新疆农业大学, 2006]
- National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. List of National Key Protected Wild Plants in China [EB/OL]. (2021-09-07) [2021-09-07]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm. [国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生植物名录 [EB/OL]. (2021-09-07) [2021-09-07]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm]
- Nordin LJ, Maloney D, Rex JF, et al. The bowron river watershed: A landscape level assessment of post-beetle change in stream riparian function [J]. *Natural Resources Canada*, 2008, 22.

- Peng P, Hou YJ, Xu Z, *et al.* Study on ecological benefits of different type communities of tea garden [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2004, 17 (6): 769–772. [彭萍, 侯渝嘉, 徐泽, 等. 不同类型群落茶园生态效应研究 [J]. 西南农业学报, 2004, 17 (6): 769–772]
- Qin JD. The relationships between insects and plants [J]. *Bulletin of Biology*, 1985, 10: 16–18. [钦俊德. 昆虫与植物的关系 [J]. 生物学通报, 1985, 10: 16–18]
- Sun J. Reflections on the afforestation in Urumqi—taking Yamalik Mountain as an example [J]. *Forestry of Xinjiang*, 2015, 2: 28–29. [孙剑. 对乌鲁木齐市荒山绿化工程的思考—以雅玛里克山荒山绿化为例 [J]. 新疆林业, 2015, 2: 28–29]
- Uhl B, Wöllfling M, Fiedler K. From forest to fragment: Compositional differences inside coastal forest moth assemblages and their environmental correlates [J]. *Oecologia*, 2021, 195, 2: 453–467.
- Wang JF, Han DY, Wang JB, *et al.* Variations in plant species composition and diversity of *Calamagrostis* and *angustifolia* community along soil water lever gradient in the Sanjiang Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (10): 3515–3524. [王继丰, 韩大勇, 王建波, 等. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化 [J]. 生态学报, 2017, 37 (10): 3515–3524]
- Wang L, Chen KW, Zhong GH, *et al.* Progress for occurrence and management and the strategy of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 479–487. [王磊, 陈科伟, 钟国华, 等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 479–487]
- Wang L, Yi CH, He QJ. Progress of butterfly biodiversity in China [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2009, 39 (1): 105–107. [王琳, 易传辉, 和秋菊. 我国蝶类昆虫生物多样性研究进展 [J]. 山东林业科技, 2009, 39 (1): 105–107]
- Wang MZ, Bi HJ, Jin S, *et al.* Effect of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (3): 981–988. [王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39 (3): 981–988]
- Wu YR. Fauna Sinica, Insecta: Vol. 20. Hymenoptera: Melittidae Apidae [M]. Academia Sinica, 2000. [吴燕如. 中国动物志. 昆虫纲: 第二十卷, 膜翅目: 准蜂科 蜜蜂科 [M]. 科学出版社, 2000]
- Wu YR. Hymenoptera Apoidea [M]. Science Press, 1965. [吴燕如. 膜翅目蜜蜂总科 [M]. 科学出版社, 1965]
- Xu G, Liu FY. Investigation of ephemeral and quasi-ephemeral plants in early spring in Yamalik Mountain [J]. *Shihezi Science and Technology*, 2007, 5: 21–24. [许刚, 刘方源. 雅玛里克山早春短命、类短命植物调查 [J]. 石河子科技, 2007, 5: 21–24]
- Xu HL, Yang JW, Sun JR. Current status on the study of wild bee – pollinators and conservation strategies in China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2009, 36 (4): 371–376. [徐环李, 杨俊伟, 孙洁茹. 我国野生传粉蜂的研究现状与保护策略 [J]. 植物保护学报, 2009, 36 (4): 371–376]
- Yang P, Deng HL, Qi B, *et al.* The occupied rate of microhabitats, sampled percentage of species and relative abundance of butterfly community in the Three Gorge Reservoir Area of Yangtze River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (3): 543–554. [杨萍, 邓合黎, 漆波, 等. 长江三峡库区蝶类群落的物种获得率、小生境占有率及相对多度 [J]. 生态学报, 2005, 25 (3): 543–554]
- Yao JY, Qi JQ, Zhang LH, *et al.* Effects of anthropogenic disturbance on species diversity and soil physicochemical properties of *Symplocos sumuntia* secondary forest in Bifengxia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37 (10): 2942–2950. [姚俊宇, 齐锦秋, 张柳桦, 等. 人为干扰对碧峰峡山矾次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (10): 2942–2950]
- Yao XL, Hao JF, Qi JQ, *et al.* Effects of human disturbance on community structure and species diversity of *Schima superba* secondary forest in Bifengxia, western Sichuan [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45 (11): 18–26. [姚小兰, 郝建锋, 齐锦秋, 等. 人为干扰对川西碧峰峡木荷次生林群落结构和物种多样性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (11): 18–26]
- Ye LQ. Disturbance and biodiversity [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2000, 17 (2): 46–53. [叶林奇. 干扰与生物多样性 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2000, 17 (2): 46–53]
- Ye WY, Yin LK, Qian Y, *et al.* Study on the vegetation type of Yamalike Mountain and plant diversity characteristic [J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2005, 27 (2): 1–4. [叶卫英, 尹林克, 钱翌, 等. 雅玛里克山植被类型及物种多样性的特征 [J]. 新疆环境保护, 2005, 27 (2): 1–4]
- Zeng H, Chen CL, Yu J, *et al.* Effects of human interference on species diversity and biomass of *Eucalyptus grandis* plantation in Cangping Mountain Park in Ya'an [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38 (2): 253–261. [曾洪, 陈聪琳, 喻静, 等. 人为干扰对雅安苍坪山公园桉树人工林物种多样性和生物量的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38 (2): 253–261]
- Zhang HW, Ma JY, Chen FH, *et al.* Investigation of the spatial variability of fertility in wastewater irrigated soils in Yamalik Mountain, Urumqi, China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 8: 185–191 [张慧文, 马剑英, 陈发虎, 等. 乌鲁木齐市雅玛里克山污水灌溉土壤肥力的空间变异研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 8: 185–191]
- Zhang LW, Zhang HY. Research progress in butterfly as indicators for habitat change [J]. *Journal of Biology*, 2016, 33 (3): 88–91. [张立微, 张红玉. 蝶类对生境的指示作用研究进展 [J]. 生物学杂志, 2016, 33 (3): 88–91]
- Zhu HC. Current situation and suggestion of city afforestation in Urumchi [J]. *Contemporary Horticulture*, 2013, 16: 152–154. [朱淳海. 乌鲁木齐市雅玛里克山绿化现状与发展建议 [J]. 现代园艺, 2013, 16: 152–154]