

上海城市近自然森林的重建动态

宋 坤^{1,2,3} 郭雪艳^{1,2} 王泽英¹ 黄莎莎¹ 严佳瑜¹ 叶建华⁴ 乐 莺⁵ 严 明⁵
吴 梅⁶ 达良俊^{1,2,3*}

(¹华东师范大学生态与环境科学学院, 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200241; ²上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; ³崇明生态研究院, 上海 200062; ⁴上海市浦东新区林业站, 上海 201210; ⁵上海市公共绿地建设事务中心, 上海 201199; ⁶上海浦发生态建设发展有限公司, 上海 201209)

摘 要 近自然森林作为城市植被恢复的重要模式, 已在我国多地开展了实践, 并衍生了新的造林模式。为评估不同近自然森林建设模式的群落恢复进程, 本研究以上海城市裸地上重建的近自然森林为对象, 通过长期监测两处分别应用原“宫胁法”与新“异龄复层落叶—常绿混交林”种植模式的近自然森林重建过程, 从物种组成、垂直结构、生活型组成和目标恢复物种 4 个方面解析恢复动态。结果表明: 两种造林模式恢复的近自然森林, 随恢复进程其物种组成逐渐趋同, 在十多年内已形成了落叶—常绿垂直混交结构。“异龄复层落叶—常绿混交林”造林模式可更好地促进常绿阔叶树种的恢复, 尤其是常绿建群种红楠与小叶青冈。本研究证实了近自然森林恢复技术可以缩短亚热带森林群落向演替后期发展的时间, 以及新造林模式的有效性, 为近自然森林技术的应用与实施提供了科学依据。

关键词 生态恢复; 植被重建; 城市森林; 植被工程

Restoration dynamics of near-to-nature forests in Shanghai. SONG Kun^{1,2,3}, GUO Xue-yan^{1,2}, WANG Ze-ying¹, HUANG Sha-sha¹, YAN Jia-yu¹, YE Jian-hua⁴, LE Ying⁵, YAN Ming⁵, WU Mei⁶, DA Liang-jun^{1,2,3*} (¹Zhejiang Tiantong Forest Ecosystem National Observation and Research Station, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; ²Shanghai Key Lab for Urban Ecological Process and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China; ³Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China; ⁴Shanghai Pudong Forestry Station, Shanghai 201210, China; ⁵Shanghai Public Green Space Construction Affairs Center, Shanghai 201199, China; ⁶Shanghai Pufa Ecological Construction Development Co., Ltd., Shanghai 201209, China).

Abstract: Construction of near-to-nature forests is an important way to restore vegetation in cities. This method has been used in several Chinese cities, with new afforestation models being emerged recently. To assess restoration dynamics of near-to-nature forests using different afforestation models, we carried out long-term monitoring on two near-to-nature forests in Shanghai, which were constructed by the Miyawaki model and a new deciduous-evergreen bi-cohort-and-synusia model respectively. The restoration dynamics were compared between the two models in terms of species composition, vertical structure, life form component and population size of target species. The results showed that species composition became more similar with increasing recover years between the two forests. Over a decade, both models created a kind of mixed forests with deciduous trees dominating the canopy and evergreen trees dominating the understory. The new bi-cohort-and-synusia model was better for the recovery of evergreen tree species, especially for the constructive species, *Machilus thunbergii* and *Cyclobalanopsis myrsinifolia*. This study provides empirical evidence that near-to-nature restoration method could shorten restoration time from

国家自然科学基金(31500355、31770468)、国家科技基础性工作专项(2015FY210200-4)和上海市科委“科技创新行动计划”(18DZ1204600)资助。

收稿日期: 2019-08-21 接受日期: 2020-01-08

* 通讯作者 E-mail: ljda@des.ecnu.edu.cn

bare ground to later succession stage in subtropical region. We recommend restoring urban vegetation by the new bi-cohort-and-synusia model to construct near-to-nature forests.

Key words: ecological restoration; vegetation re-construction; urban forest; vegetation engineering.

“近自然森林”源于日本著名生态学家宫胁昭 (Miyawaki, 1993, 1998) 的“环境保护林”的概念,即遵循生态学的群落演替和潜在自然植被理论,选择适宜的乡土种,应用容器育苗种植等“模拟自然”的植被工程学技术,通过早期人工种植与后期植被自然生长的结合,建设以地带性植被类型为目标,群落结构完整、物种多样性丰富、生物量高、趋于稳定的发展状态、后期遵循自然演替规律的“少人工管理型”森林(达良俊等, 2004b; 达良俊等, 2019)。其定义可概括为:以后期自然生长为主,应用“模拟自然”的方法所营建的在物种组成和群落结构上与区域顶级群落接近的人工森林(陈伟峰等, 2004; 达良俊等, 2004b)。

近自然森林的理念和实践从提出到现在,已成功地在全球各地得到了广泛应用,如北美(Bergeron *et al.*, 1997; Schulte *et al.*, 1998),日本(Miyawaki, 1993; Hotta *et al.*, 2015; Sasaki *et al.*, 2018),马来西亚(Miyawaki, 1993),巴西(Muler *et al.*, 2018),欧洲(Bengtsson *et al.*, 2000; Doroski *et al.*, 2018)等,实现了多种森林植被类型的群落重建,包括落叶阔叶林、常绿阔叶林、热带雨林,有效地促进了生物多样性的保护和自然植被恢复。中国近自然森林建设的实践始于1997年,应用于长城周边荒山的造林,之后在马鞍山被应用于尾矿植被恢复,青岛、徐州和宁波等市则作为高速公路两侧绿带建设的一种方法(王仁卿等, 2002; 达良俊等, 2003; 达良俊等, 2004b)。

近自然森林在城市森林建设中的实践最早始于上海。达良俊等于2000年在上海浦东新区构建了3000 m²的城市近自然森林示范地(达良俊等, 2004b; 达良俊等, 2011),2001年在上海最大的跨世纪生态工程—上海环城绿带建设中营造了20000 m²的近自然森林(陈伟峰等, 2004)。此后,城市近自然森林建设的尝试陆续在全国各地开展(何见, 2014; 达良俊等, 2019)。由于城市近自然森林在我国的实践尚不足20年,对其恢复动态过程及其恢复效果的评估鲜有报导。在对上海浦东城市近自然森林示范地恢复动态近10年监测的基础上,达良俊等(2011)评估了传统“宫胁法”的优缺点,提出了“异

龄复层落叶—常绿混交林”的种植模式,以增加演替后期常绿树种的存活率和生长速度,加速植被向常绿落叶阔叶林方向的恢复进程。改进的近自然种植模式于2006年起陆续在上海多地得到推广。

本研究通过分析上海城市近自然森林长期恢复动态过程,比较不同种植模式下,群落植物多样性、物种组成和群落结构恢复动态的差异,检验“异龄复层落叶—常绿混交林”的种植模式是否能有效地促进植被恢复,为城市近自然森林建设与管理提供数据支撑和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

上海(120°51'E—122°12'E, 30°40'N—31°53'N)属北亚热带季风性气候,气候温和湿润,年平均气温15.8℃,最冷月(1月)平均气温3.8℃,最热月(7月)平均气温27.9℃,全年无霜期平均241 d。年日照2000 h左右,年平均降雨量1200 mm,降雨量60%集中于5—9月。由于其处于常绿阔叶林与落叶阔叶林的交错带,地带性植被为含有落叶成分的常绿阔叶林(达良俊等, 2004a)。残存自然植被主要分布在佘山和近岸的大金山等海岛上,主要群落类型为苦槠群落(Comm. *Castanopsis sclerophylla*)、青冈群落(Comm. *Cyclobalanopsis glauca*)和红楠群落(Comm. *Machilus thunbergii*)等(周秀佳, 1984; 达良俊等, 2004a)。

1.2 样地设置与调查

选择位于上海浦东新区和闵行区的两块城市近自然森林为研究对象,前者采用传统的“宫胁法”种植模式,后者采用改进的“异龄复层落叶—常绿混交林”种植模式。两个区域均处于上海“冈身线”以西的平原地区,造林前均为城市裸地,后利用客土营建了小地形,坡度不超过5°,其潜在植被为含有落叶成分的常绿阔叶林。浦东城市近自然森林位于浦东新区迎春路和张家浜河之间,建于2000年,总面积为3000 m²,所有苗木高度0.2~0.8 m,种植密度4株·m⁻²(达良俊等, 2011)。闵行区近自然森林样地位于华东师范大学闵行校区校园内樱桃河旁的河

表 1 上海城市近自然林营建苗木概况
Table 1 Information summary of seedlings used in construction of two near-to-nature forests in Shanghai

区域 Site	项目 Item	常绿乔木 Evergreen trees	常绿灌木 Evergreen shrubs	落叶乔木 Deciduous shrubs
浦东新区近自然森林 Pudong site	规格 Size	高度 0.2~0.8 m Height 0.2~0.8 m	高度 0.2~0.8 m Height 0.2~0.8 m	高度 0.2~0.8 m Height 0.2~0.8 m
	主要物种 Main species	红楠 (<i>Machilus thunbergii</i>)、青冈 (<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)、小叶青冈 (<i>Cyclobalanopsis myrsinifolia</i>)、苦槠 (<i>Castanopsis sclerophylla</i>)、女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)	海桐 (<i>Pittosporum tobira</i>)、蚊母树 (<i>Distylium racemosum</i>)、洒金桃叶珊瑚 (<i>Aucub japonica</i> var. <i>Variegata</i>) 和八角金盘 (<i>Fatsia japonica</i>)	枫香 (<i>Liquidambar formosana</i>)
闵行区近自然森林 Minghang site	规格 Size	高度 0.4~0.8 m Height 0.2~0.8 m	高度 0.4~0.8 m Height 0.2~0.8 m	高度 1.5~2 m; 胸径 2~4 cm Height 0.2~0.8 m; DBH 2~4 cm
	主要物种 Main species	红楠 (<i>M. thunbergii</i>)、青冈 (<i>C. glauca</i>)、小叶青冈 (<i>C. myrsinifolia</i>)、女贞 (<i>L. lucidum</i>)	舟山新木姜子 (<i>Neolitsea sericea</i>)、蚊母树 (<i>D. racemosum</i>) 和八角金盘 (<i>F. japonica</i>)	楝树 (<i>Melia azedarach</i>)、朴树 (<i>Celtis sinensis</i>)、枫香 (<i>L. formosana</i>)、合欢 (<i>Albizia julibrissin</i>)、枫杨 (<i>Pterocarya stenoptera</i>)、麻栎 (<i>Quercus acutissima</i>)

滨路,建于 2006 年,总面积约为 3500 m²;其中落叶乔木树种苗木高度 1.5~2.5 m,常绿树种苗木高度 0.4~0.8 m,前者种植密度为 0.5 株·m⁻²,后者为 4 株·m⁻²。具体种植苗木组成见表 1。苗木种植后,用秸秆覆盖,种植后半年内,进行 1~2 次除草,苗木成活率约为 95%。

为避免边缘效应,分别在两处近自然森林的中心区域设置两个 10 m×10 m 的固定样方,对样地内所有个体进行标记。其中,浦东近自然森林于种植后 3 个月、1 年、3 年、4 年、6 年、10 年和 18 年进行了追踪调查,闵行近自然森林于种植后 3 个月、1 年、2 年、6 年、12 年进行了追踪调查。每次调查,对高度大于 1.5 m 的个体,测定每株的树高、胸径等指标;对高度小于 1.5 m 的个体,记录高度。

1.3 数据分析

本分析均以高度大于等于 1.5 m 个体为对象,采用胸高断面积(BA)表征物种的优势度。为检验两处近自然种植模式恢复过程中物种组成是否趋同,采用非度量多维标度(Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS)方法进行群落排序(Matthews et al. 2010; Rydgren et al. 2019),使用 Bray 距离度量样方间的物种相似性(Ruiz-Jaén et al. 2006)。用胁强系数(Stress)来度量 NMDS 分析结果的拟合优度;Stress < 0.05 为拟合极好;Stress < 0.1 为拟合较好;Stress < 0.2 为拟合一般;Stress > 0.3 为拟合较差(王合玲等 2012)。

通过分析群落垂直结构及各垂直层次上常绿/落叶树种相对优势度的变化,解析近自然森林的发展方向(Hirayama et al. 2011; Hotta et al. 2015;

Sasaki et al. 2018);并分别从个体密度和胸高断面积总和两个方面对比两种种植模式中常绿阔叶树种的恢复动态。由于初始种植密度存在差异,以 BA 与初始种植个体数的比值,即标准化 BA,进行比较。

2 结果与分析

2.1 物种组成相似性

基于胸高断面积的 NMDS 分析能够揭示近自然森林不同恢复时期群落的关联。本次分析采用 4 维排序空间,其胁强系数(Stress)为 0.002,说明 NMDS 分析具有很好的拟合效果。图中样方彼此距离越近意味着彼此物种组成相似性越高。从 NMDS 排序图可以看出(图 1)随着恢复的进行,闵行和浦东两地在排序空间中的距离逐渐缩小,表明两地近自然森林的物种组成趋于一致。

2.2 群落垂直结构

基于 1.5 m 以上个体的高度分布频率的分析表

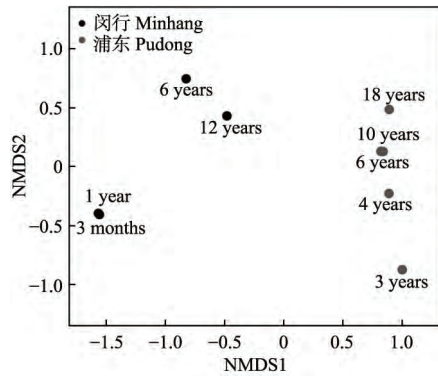


图 1 上海浦东和闵行近自然林不同恢复时期群落 NMDS 排序图
Fig.1 NMDS ordination of near-to-nature forests in different years after restoration at Pudong and Minhang, Shanghai

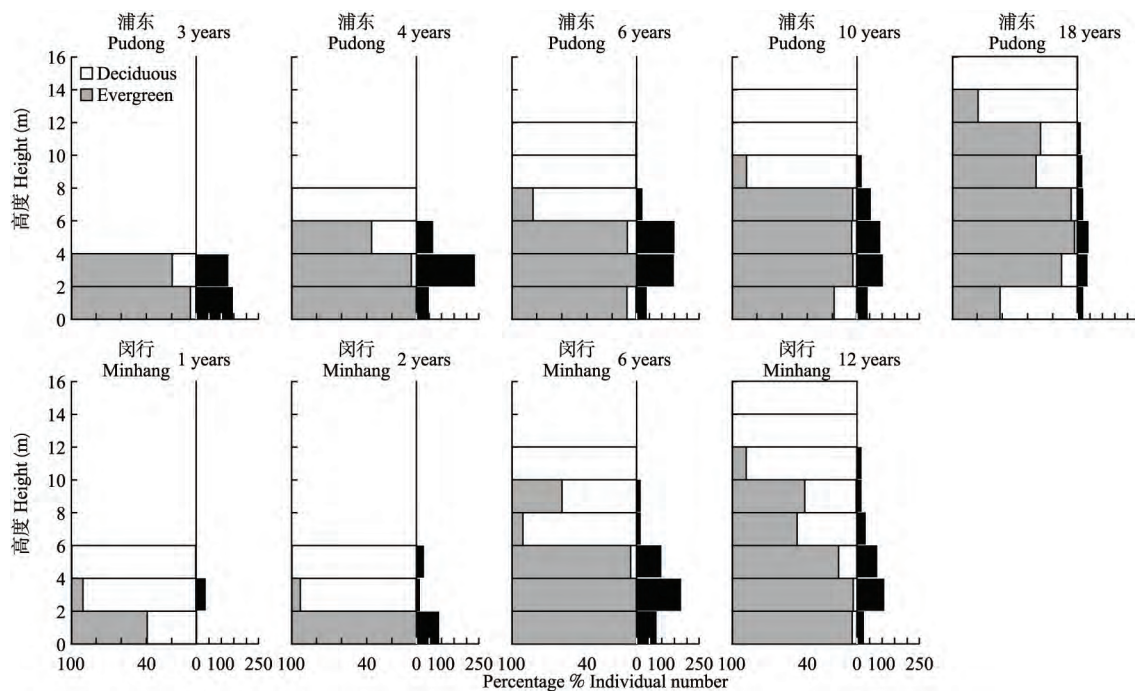


图2 上海浦东和闵行近自然森林不同恢复时期垂直结构及生活型组成变化

Fig.2 Variation of vertical distribution of trees and leaf habit composition after restoration of near-to-nature forests at Pudong and Minhang, Shanghai

明 随着植被的恢复,两处近自然森林的林冠最大高度逐渐增大。尽管闵行近自然森林因种植了落叶幼树,其早期群落高度较浦东高出2~4 m,但恢复至第6年后两处林冠最大高度均达到10 m以上,此后两者保持较为一致的冠高(图2)。

从常绿/落叶树种在各垂直层次的比例来看,闵行近自然森林一直保持落叶-常绿垂直混交结构,即冠层落叶树种占优势、林下常绿树种占优势;浦东则在恢复4年后形成了落叶-常绿垂直混交结构(图2)。并且,恢复6年后,即便两地林冠高度一致,闵行近自然森林中常绿树种垂直分布的最大高度比浦东近自然森林高一个层级。这表明闵行近自然森林的种植模式更有利于常绿阔叶树种的生长。

2.3 常绿阔叶树种比例

两处近自然森林中的常绿阔叶树种,个体密度及其在群落中的占比表现出一致的恢复进程(图3)。恢复至第6年时,两处近自然森林常绿树种的个体密度和个体数量占比达到最大值,分别约为16000株·hm⁻²、90%;此后其个体密度逐渐降低,但其个体数量占比维持在80%左右。

随着植被恢复,两处近自然林常绿阔叶树种的BA值逐渐增大,恢复6年后闵行的常绿阔叶树种BA值超过浦东,且差距逐渐加大(图3)。由于闵行

近自然森林采用落叶阔叶树种幼树进行恢复,因而恢复初期常绿阔叶树种的相对BA值很低,随植被恢复逐渐增加;而浦东常绿阔叶树种的相对BA值随植被恢复逐渐减少;恢复至12年后,两处的常绿阔叶树种相对BA值约为40%~50%(图3)。这表明,闵行近自然林的种植模式更有利于常绿阔叶树种的恢复。

从上海近自然森林目标恢复树种,即演替中后期的常绿阔叶树种来看(图4),其中红楠在浦东近自然林恢复6年后大幅减少,而在闵行其总BA值保持增加趋势;小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)在闵行的增幅在恢复6年后明显大于浦东,青冈则在两处表现出较为一致的恢复趋势。这表明闵行近自然森林的复层模式有助于红楠和小叶青冈这类偏好荫生环境树木的生长。

3 讨论

促进植被向演替后期群落恢复是近自然森林的重要恢复目标,对于以生态环境保护为主导的城市森林,可以考虑恢复气候和土壤顶极群落。上海地处亚热带北缘,其地带性植被被认为是常绿阔叶林(周秀佳,1984),因而常绿阔叶林是上海近自然森林的终极恢复目标。此外,加速群落的自然演替过

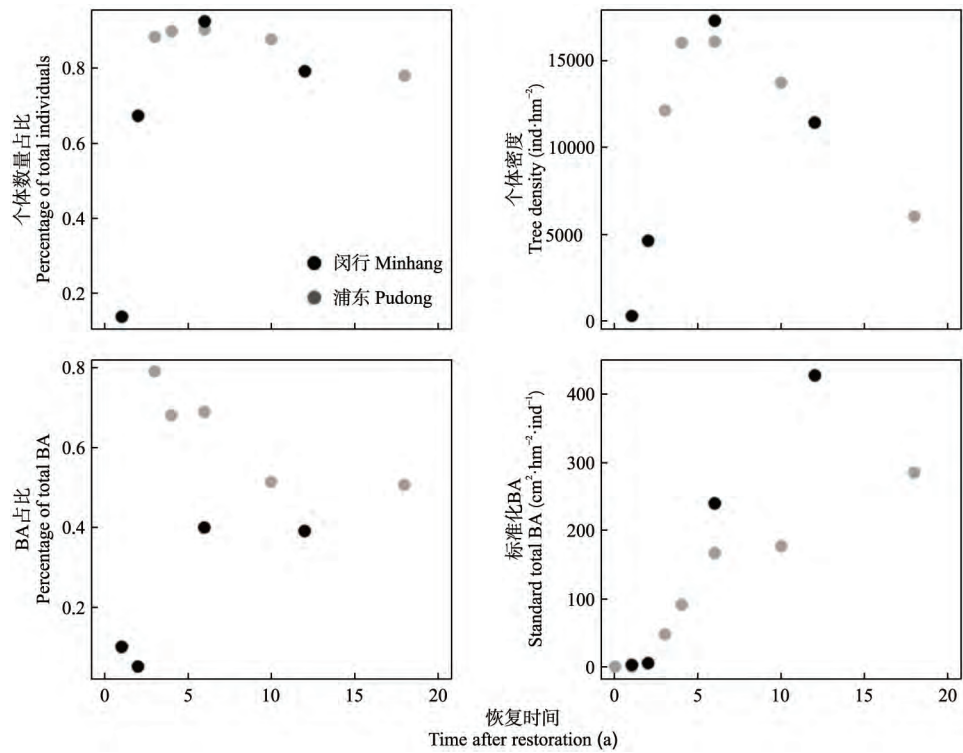


图 3 上海浦东和闵行近自然林常绿阔叶成分的恢复动态
Fig.3 Variation of evergreen broadleaved trees after restoration of near-to-nature forests at Pudong ,Shanghai

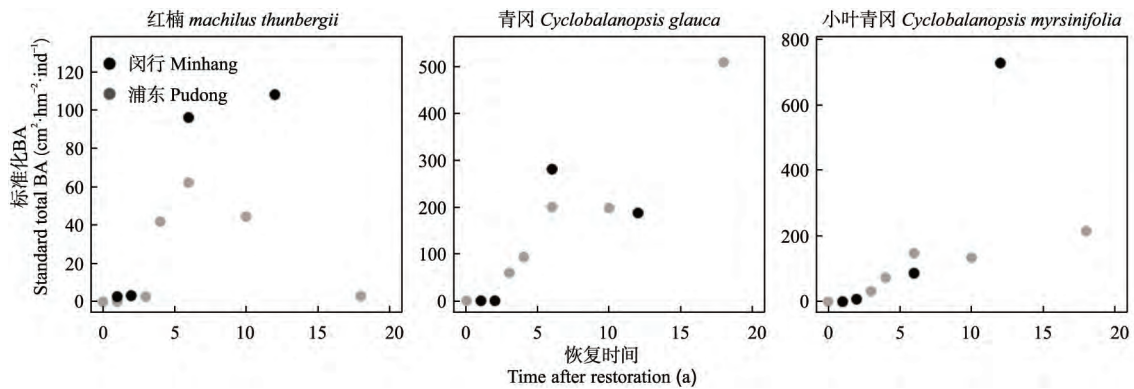


图 4 上海近自然森林常绿阔叶目标恢复树种胸高断面积的变化
Fig.4 Variation of BA of evergreen broadleaved target trees in restored near-to-nature forests ,Shanghai

程是近自然森林恢复的另一个重要目标。在自然条件下,亚热带受损常绿阔叶林的恢复过程是漫长的,其演替模式基本可以概括为:次生裸地—灌丛—针叶林—针阔混交林—阳性常绿阔叶林—中生顶极常绿阔叶林(宋永昌等,1995)。在我国东部典型常绿阔叶林区,整个演替所需时间约为150年以上(宋永昌,2013)。在水热条件好的地区恢复至针阔混交林或常绿落叶阔叶混交林也需30~50年(宋永昌,2013; Sasaki *et al.* 2018)。本研究结果表明,两处近自然森林在短短的十多年内形成了具有落叶-常绿

垂直混交结构的森林。因而,上海近自然森林实践基本达成了主要恢复目标。

传统的近自然森林恢复方法,即宫脇生态造林法(Miyawaki' s method) (王希华等,1999; 王仁卿等 2002),已经在全球各地开展了实践,期间具体的营造工法不断改进。达良俊等(2011)针对宫脇生态造林法在上海实践过程中表现出的问题——目标恢复物种,即地带性植被主要建群种的苦槠、红楠、青冈和青栲等常绿阔叶树种在种植初期由于强光灼伤死亡率高,提出了“异龄复层落叶-常绿混交

林”造林模式,即在目标常绿树种上层配植树龄较大的速生阳性落叶阔叶树种,形成异龄复层的群落结构。研究表明,该造林模式由于采用落叶树种幼树与常绿树种幼苗相结合的配置模式,使得植被恢复初期落叶树种大径级个体较多,形成了更高的由落叶阔叶树种主导的林冠,实现了对下层常绿目标树种的遮阳效果(Laughlin *et al.*, 2018; Mian-drinanana *et al.*, 2019),降低了种植初期林下常绿阔叶树种死亡率。因此,恢复6年后,在采用新模式的闵行近自然林内,常绿阔叶树种优势度更大,占据的垂直空间层级也更高。尤其是常绿建群种红楠并未出现原造林模式在恢复中后期个体数量和胸高段面积值逐渐减小的现象,反而稳步增加;小叶青冈的优势度增幅也显著高于浦东。这也从侧面验证了新模式的另一个优点,即落叶阔叶树种枯枝落叶可作为有机肥料供植物生长,缓解原种植模式恢复前期土壤养分供应短缺的问题(Suthar *et al.*, 2014)。

尽管“异龄复层落叶-常绿混交林”造林模式有效地促进了近自然森林的恢复进程,但并未改变群落演替发展的路径。虽然新造林模式应用了大量落叶阔叶树种,但随着植被恢复其物种组成逐渐与原造林模式接近,这是因为两种模式选用了相似的常绿阔叶树种为恢复目标建群种,在恢复后期它们逐渐成为群落优势物种。此外,在常绿树种个体数量/相对优势度和群落垂直结构方面,新造林模式与原造林模式表现高度一致的变化规律。这可能是因为两种造林模式均采用统一的高密度种植方式,恢复过程中个体竞争激烈、自然稀疏效应显著(Hirayama *et al.*, 2011; Sasaki *et al.*, 2018)。这也可能与两地造林均以常绿木本植物数量占优有关。

在生态恢复实践中,需要长期监测恢复措施实施后的生态响应,并对恢复效果进行评估(Ruiz-Jaén *et al.*, 2006; 张青等, 2016; Sasaki *et al.*, 2018; Rydgren *et al.*, 2019; 刘尧尧等, 2019),但很多生态恢复实践忽略了这一点。本研究作为上海近自然森林恢复的重要环节,通过分析长期监测结果,对恢复目标的达成性及技术方法的有效性进行了评估,并由此进行了技术调整、修改了造林模式,有效地促进了城市裸地近自然森林的恢复。当前,我国十分重视退化生态系统的重建与恢复,各地开展实施了各类生态恢复项目。我们认为,在生态恢复规划、实施等各阶段,应充分考虑监测与评估的作用,利用监测数据开展评估,并产生反馈,以进一步指导恢复实

践,优化恢复效果。

参考文献

- 陈伟峰, 达良俊, 陈克霞, 等. 2004. “宫胁生态造林法”在上海外环城绿带建设中的应用. 中国城市林业, (5): 21-23. [Chen WF, Da LJ, Chen KX, *et al.* 2004. Application of "Miyawaki's ecological method to reforestation" in the construction of outer ring road greenbelt in Shanghai. *Journal of Chinese Urban Forestry*, (5): 21-23.]
- 达良俊, 郭雪艳. 2019. 上海城市生态建设“四化”内涵的生态学释意. 园林, (1): 8-13. [Da LJ, Guo XY. 2019. Ecological interpretation on the connotations of "Afforestation, colorization, preciousness, efficiency" during urban ecological construction in Shanghai. *Landscape Architecture*, (1): 8-13.]
- 达良俊, 许东新. 2003. 上海城市“近自然森林”建设的尝试. 中国城市林业, (2): 17-20. [Da LJ, Xu DX. 2003. An attempt to build a "close-to-nature forest" in Shanghai. *Journal of Chinese Urban Forestry*, (2): 17-20.]
- 达良俊, 杨珏, 霍晓丽. 2011. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(VII): 上海浦东近自然森林十年间的动态变化及模式优化. 华东师范大学学报(自然科学版), (4): 15-23. [Da LJ, Yang J, Huo XL. 2011. Diversity, spatial pattern and dynamics of vegetation under urbanization in Shanghai (VII): Dynamics and a better construction method of the near-natural forest in Pudong of Shanghai for recent ten years. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (4): 15-23.]
- 达良俊, 杨永川, 陈燕萍. 2004a. 上海大金山岛的自然植物群落多样性. 中国城市林业, (3): 22-25. [Da LJ, Yang YC, Chen YP. 2004a. The diversity of plant community on Dajinshan Island, Shanghai. *Journal of Chinese Urban Forestry*, (3): 22-25.]
- 达良俊, 杨永川, 陈鸣. 2004b. 生态型绿化法在上海“近自然”群落建设中的应用. 中国园林, (3): 41-43. [Da LJ, Yang YC, Chen M. 2004b. The method of ecological greening and its application in the construction of the approaching nature plant community in Shanghai. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, (3): 41-43.]
- 何见. 2014. 城市森林近自然化经营技术与对策研究——以樟树市城市森林建设为例. 四川林业科技, 35(2): 74-78. [He J. 2014. A Study of Technology and Measures of Close-to-nature Management of Urban Forests: Taking Urban Forests in Zhangshu City as an example. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 35(2): 74-78.]
- 刘尧尧, 辜彬, 王丽. 2019. 北川震后植被恢复工程植物群落物种多样性及优势种生态位. 生态学杂志, 38(2): 309-320. [Liu YY, Gu B, Wang L. 2019. Species diversity of plant community and the niche of dominant species in Beichuan after earthquake engineering. *Chinese Journal of Ecology*, 38(2): 309-320.]
- 宋永昌, 王祥荣. 1995. 浙江天童国家森林公园的植被与区系. 上海: 上海科学技术文献出版社. [Song YC, Wang

- XR. 1995. Vegetation and Flora of Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press.]
- 宋永昌. 2013. 中国常绿阔叶林: 分类·生态·保育. 北京: 科学出版社. [Song YC. 2013. Evergreen Broadleaved Forest in China: Classification, Ecology, Conservation. Beijing: Science Press.]
- 王合玲, 吕光辉, 张辉国. 2012. 干旱区典型湖泊湿地主要植物生态种组分析. 生态环境学报 21(5): 858–863. [Wang HL, Lv GH, Zhang HG. 2012. Ecological species group analysis of main plants in the typical lake wetland of arid area. *Ecology and Environmental Sciences*, 21: 858–863.]
- 王仁卿, 张淑萍, 葛秀丽. 2002. 利用宫胁森林重建法恢复和重建山东森林植被. 山东林业科技, (4): 3–7. [Wang RQ, Zhang SP, Ge XL. 2002. Restoration and reconstruction of Shandong forest vegetation using Miyawaki method. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, (4): 3–7.]
- 王希华, 陈小勇. 1999. 宫胁法在建设上海城市生态环境中的应用. 上海环境科学, (2): 100–101, 104. [Wang XH, Chen XY. 1999. Application of Miyawaki method to the construction of shanghai urban ecological environment. *Shanghai Environmental Sciences*, (2): 100–101, 104.]
- 张青, 毕润成, 吴兆飞, 等. 2016. 安太堡露天煤矿植被恢复区物种天然更新时空动态. 生态学杂志, 35(12): 3223–3232. [Zhang Q, Bi RC, Wu ZF, et al. 2016. Temporal-spatial dynamics of natural regeneration of species in ecological reclamation of Antaibao Opencast Coal Mine. *Chinese Journal of Ecology*, 35(12): 3223–3232.]
- 周秀佳. 1984. 上海的主要自然植被类型及其分布. 植物生态学与地植物学丛刊, (3): 189–198. [Zhou XJ. 1984. The main natural vegetation types of Shanghai and their distribution. *Chinese Journal of Plant Ecology*, (3): 189–198.]
- Bengtsson J, Nilsson SG, Franc A, et al. 2000. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecology and Management*, 132: 39–50.
- Bergeron Y, Harvey B. 1997. Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: an approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*, 92: 235–242.
- Doroski DA, Felson AJ, Bradford MA, et al. 2018. Factors driving natural regeneration beneath a planted urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29: 238–247.
- Hirayama K, Yamada K, Nishimura T, et al. 2011. Changes in species composition and diversity with respect to the successional stage of urban forests in Kyoto city, western Japan. *Journal of the Japanese Forest Society*, 93: 21–28.
- Hotta K, Ishii H, Sasaki T, et al. 2015. Twenty-one years of stand dynamics in a 33-year-old urban forest restoration site at Kobe Municipal Sports Park, Japan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14: 309–314.
- Laughlin DC, Clarkson BD. 2018. Tree seedling survival depends on canopy age, cover and initial composition: trade-offs in forest restoration enrichment planting. *Ecological Restoration*, 36: 52–61.
- Matthews JW, Spyreas G. 2010. Convergence and divergence in plant community trajectories as a framework for monitoring wetland restoration progress. *Journal of Applied Ecology*, 47: 1128–1136.
- Miandrimanana C, Reid JL, Rivoaharison T, et al. 2019. Planting position and shade enhance native seedling performance in forest restoration for an endangered Malagasy plant. *Plant Diversity*, 41: 118–123.
- Miyawaki A. 1993. Restoration of native forests from Japan to Malaysia// Lieth H, Lohmann M, eds. Restoration of Tropical Forest Ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands: 5–24.
- Miyawaki A. 1998. Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology. *Ecological Engineering*, 11: 157–165.
- Muler AE, Prieto PV, Richards RC, et al. 2018. Ecological outcomes and popular perceptions of urban restored forests in Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Conservation*, 45: 155–162.
- Ruiz-Jaén MC, Aide TM. 2006. An integrated approach for measuring urban forest restoration success. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4: 55–68.
- Rydgren K, Halvorsen R, Töpper JP, et al. 2019. Advancing restoration ecology: A new approach to predict time to recovery. *Journal of Applied Ecology*, 56: 225–234.
- Sasaki T, Ishii H, Morimoto Y. 2018. Evaluating restoration success of a 40-year-old urban forest in reference to mature natural forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32: 123–132.
- Schulte BJ, Buongiorno J. 1998. Effects of uneven-aged silviculture on the stand structure, species composition, and economic returns of loblolly pine stands. *Forest Ecology and Management*, 111: 83–101.
- Suthar S, Gairola S. 2014. Nutrient recovery from urban forest leaf litter waste solids using *Eisenia fetida*. *Ecological Engineering*, 71: 660–666.

作者简介 宋 坤,男,1983年生,博士,副教授,主要从事植被生态学研究。E-mail: ksong@des.ecnu.edu.cn
责任编辑 李凤芹