

香果树根萌苗生长特性及影响因子分析

郭连金, 薛苹苹, 邵兴华, 田玉清, 肖志鹏

(上饶师范学院, 江西上饶 334001)

摘要: 香果树 (*Emmenopterys henryi*) 为我国 II 级野生保护植物, 由于生境遭到破坏、过度开发利用以及种群自然更新能力差等原因, 导致自然环境下香果树种群数量迅速衰减。运用方差分析、多重比较、主成分分析等方法, 对自然环境下香果树种群的根萌苗生长状况及其主要影响因子进行了研究。结果表明: 香果树根萌苗的数量随着苗龄的增长逐渐减少, 1a 根萌苗的死亡率最高; 苗高和基径均随苗龄的增大呈指数增长; 香果树根萌苗主要生长在母树东南方 $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ (以正北方为 0° 按顺时针方向旋转, 下同) 位置、距母树树干 2 m 以内及直径 2 cm、长度 30 cm 的露根上; 根萌苗苗高受母树方位影响较小, 受露根直径、露根长度以及与母树间距离的影响稍大; 母树南向 (168.75°) 根萌苗的基径显著大于其它方向的根萌苗基径; 与北向和南向相比, 母树东向和西向根萌苗的冠幅较大; 根萌苗苗高、基径和冠幅等形态指标均随着与母树树干间距离的增加而降低, 但随着露根直径的增加各形态指标均呈先升高后降低的趋势 (露根直径 6.5 cm 时苗高和基径达到最大值), 随着露根长度的增加各形态指标呈先降低后升高的趋势; 与树冠内根萌苗相比, 香果树母树树冠外根萌苗的死亡率较高。主成分分析结果表明, 随着林内光照条件的改善、土壤中有有机质含量的增加、砾石覆盖率的增加以及适度的人为干扰均有利于香果树根萌苗的生长。因此, 减小林冠郁闭度、增加人工抚育措施对维持香果树的种群发展、实现其种群自然更新具有重要作用。

关键词: 香果树; 根萌苗; 生长动态; 自然更新

中图分类号: Q945.51; Q948.12

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2015)02-0165-11

Growth Characteristics and Influencing Factors of *Emmenopterys henryi* Root Sprouts

GUO Lian-Jin, XUE Ping-Ping, SHAO Xing-Hua, TIAN Yu-Qing, XIAO Zhi-Peng

(Shangrao Normal University, Shangrao, Jiangxi 334001, China)

Abstract: *Emmenopterys henryi* Oliv., belonging to the genus *Emmenopterys* in the family Rubiaceae, is a rare and endangered second class state-protected plant in China. The population size of wild *E. henryi* has declined rapidly due to habitat destruction, overexploitation, and poor natural regeneration. Using variance analysis, multiple comparisons and principal component analysis, the growth characteristics and main influencing factors of *E. henryi* root sprouts were investigated and analyzed. The results showed that the number of *E. henryi* root sprouts decreased with increasing age, and one-year-old root sprouts showed the highest mortality. Height and stem base diameter both showed exponential equations with monthly increases in the age of root sprouts. Most root sprouts generated southeast of ($120^{\circ} \sim 150^{\circ}$) and within 2 m of their mother tree, and growth occurred mainly from exposed roots with a diameter of 2 cm and a length of 30 cm. The height of the root sprouts was influenced less by orientation around the mother tree, but more by the diameter and length of the exposed roots from where the sprouts generated. Compared with other sides, root sprouts growing

收稿日期: 2014-06-09, 退修日期: 2014-07-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31360145); 江西省教育厅科技计划项目 (GJJ08463)。

作者简介: 郭连金 (1976-), 男, 副教授, 主要从事植物生态学、生物多样性的教学和科研工作 (E-mail: guolianjin@163.com)。

south of the mother tree showed significantly larger stem base diameters and reached a maximum at 168.75°. The crown breadths of the root sprouts from the east and west were larger than those from the north and south. Morphological indices, including height, stem base diameter, and crown breadth of the root sprouts, declined with increasing distance from the trunk of the mother trees. The morphological indices firstly increased and then decreased with increasing diameters of the exposed roots, with the height and stem base diameter of the root sprouts reaching a maximum when the diameter of the exposed roots was 6.5 cm. The indices showed a reverse trend with increasing length of the exposed roots. The mortality of the root sprouts beyond the crown of the mother tree was larger than that under the crown. Principal component analysis indicated that light conditions, soil organic matter content, gravel coverage, and moderate artificial interferences were the main factors promoting *E. henryi* root sprout growth. To maintain development and realize natural regeneration of the *E. henryi* population, the canopy density of *E. henryi* should be reduced and artificial cultivations increased.

Key words: *Emmenopterys henryi*; Root sprout; Growth dynamics; Natural regeneration

种群的自然更新是植物在时间和空间上的延续、发展、增殖和扩散,是维持群落稳定的重要因素,它受到环境条件、自然因素、人为干扰、物种特性及其与周围植物之间的关系等因素的影响^[1]。自然更新对植物种群的稳定和群落的演替具有重要意义^[2],幼苗的数量、生长状况等都对植物种群中个体数量的变化及更新速率构成直接影响^[3]。幼苗阶段是植物个体生长最脆弱、对环境变化最敏感的时期^[4],它的生长受生物和非生物因素的共同影响,幼苗的定居和生长决定种群的格局^[1]。因此,对植物种群幼苗的生长特性及影响因素进行研究具有重要的理论和实践意义。

香果树(*Emmenopterys henryi* Oliv.)为茜草科香果树属植物,是第四纪冰川幸存的孑遗植物之一,为中国特有单属植物,是研究茜草科植物系统发育、形态演化及中国植物地理区系的重要材料,为国家Ⅱ级重点保护植物和林业部公布的国家珍贵树种^[5,6]。香果树主要分布于我国亚热带中山或低山地区的落叶阔叶林或常绿—落叶阔叶混交林中,对涵养水源、固石保土、环境保护、生物多样性维持发挥着极为重要的作用。香果树分布范围虽广但多零散生长,由于毁林开荒和乱砍滥伐,以及种子自身萌发力较低、自然更新能力差,导致其自然分布范围逐渐缩减,植株日益减少^[7]。香果树存在有性繁殖和无性繁殖两种繁殖方式^[8,9]。由于香果树种子微小(千粒重仅0.32~0.60 g),种子

萌发对光照要求苛刻,发芽率低(13%~20%),种子寿命仅一年左右^[10,11],因此,香果树有性繁殖能力较差;在自然环境下,香果树种群结构不完整,呈聚集分布,实生苗死亡率高,数量严重不足^[7,12-15],严重制约了香果树的自然更新。无性生殖作为有性生殖的补充,成为香果树自然更新的重要途径^[8],香果树根萌蘖能力较强,是无性繁殖的重要方式,而且根萌苗可通过吸收母树的养分迅速生长,比实生苗更具有竞争优势。国内对香果树无性繁殖的研究多限于扦插育苗^[16]、根埋插穗育苗^[17]以及组织培养^[18,19]等方面,而对香果树根萌苗的生长特性及其影响因素方面的研究鲜见报道。

针对严重衰退的香果树种群,根萌苗作为一种重要的更新方式,对香果树种群恢复具有关键作用。本文通过对香果树典型分布区域的香果树根萌苗的数量、生长特性以及生态因子进行研究,阐明环境因子对根萌苗生长的影响,以期为香果树种群恢复提供理论依据和技术支持。

1 研究区域自然概况

研究区域由北至南分别设在伏牛山宝天曼自然保护区(33°25'~33°33' N, 110°53'~112°E)、罗田大别山(29°45'~31°48' N, 114°~116°07'E)、三清山风景区(28°54'~28°58' N, 117°59'~118°30'E)和武夷山国家级自然保护区(27°33'~27°54' N, 117°27'~117°51'E)4个地区。其中,

宝天曼自然保护区位于伏牛山南麓、秦岭东段，年均温 $9^{\circ}\text{C} \sim 9.4^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量 893.2 mm，年均蒸发量 991.6 mm，相对湿度 51.2%， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 $4200^{\circ}\text{C} \sim 4900^{\circ}\text{C}$ ，低山区无霜期 227 d，土壤类型主要为黄棕壤、棕壤和暗棕壤，植被类型以温带落叶阔叶林为主^[20]；罗田大别山位于大别山南麓，年均温 $9.5^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量 1629 mm，相对湿度 62.5%， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 $4500^{\circ}\text{C} \sim 5500^{\circ}\text{C}$ ，土壤类型主要以黄棕壤和山地黄棕壤为主^[21]；三清山风景区位于江西德兴和玉山两县交界处，年均温 $10^{\circ}\text{C} \sim 12^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量 1840.9 mm，无霜期 266 d，相对湿度 78%，植被以常绿阔叶林、常绿—落叶阔叶混交林、山地矮曲林、针叶林、竹林等为主，土壤类型主要为红壤、黄红壤、山地黄壤、黄棕壤^[22]；武夷山国家级自然保护区年平均气温 $12^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量 2150 mm，年均蒸发量 1492 mm，相对湿度 84%，无霜期 253~272 d，土壤类型主要有红壤、黄红壤、黄壤和山地草甸土^[7]。

在以上 4 个研究地区，香果树主要分布于落叶阔叶林、常绿落叶阔叶林、针阔混交林以及毛竹林中。宝天曼香果树种群伴生种主要有：黑桦 (*Betula chinensis* Pall.)、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.)、紫荆 (*Cercis chinensis* Bunge)、小叶青冈 (*Cyclobalanopsis myrsinifolia* (Blume) Oerst.)、大叶朴 (*Celtis koraiensis* Nakai)、山胡椒 (*Lindera glauca* (Sieb. et Zucc.) Bl.)、金钱草 (*Lysimachia christinae* Hance)、三脉紫菀 (*Aster ageratoides* Turcz.) 等。罗田大别山香果树种群伴生种主要有：枫香 (*Liquidambar formosana* Hance)、大叶榉 (*Zelkova schneideriana* Hand. -Mazz.)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、多脉鹅耳枥 (*Carpinus polyneura* Franch.)、灯台树 (*Bothrocaryum controversum* (Hemsl.) Pojark.)、紫弹朴 (*Celtis biondii* Pamp.) 等。三清山风景区香果树种群伴生种主要有：甜槠 (*Castanopsis eyrei* (Champ.) Tutch.)、多脉青冈 (*Cyclobalanopsis multiervis* Cheng et T. Hong)、细叶青冈 (*Cyclobalanopsis gracilis* (Rehd. et Wils.) Cheng et T. Hong)、云锦杜鹃 (*Rhododendron*

fortunei Lindl.)、黑桤 (*Eurya macartneyi* Champ.)、圆锥绣球 (*Hydrangea paniculata* Sieb.) 等。武夷山国家级自然保护区香果树种群伴生种主要有：银鹊树 (*Tapiscia sinensis* Oliv.)、杉木、红脉钓樟 (*Lindera rubronervia* Gamble)、盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.)、野鸭椿 (*Euscaphis japonica* (Thunb.) Dippel)、毛竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de leh.)、亮叶红淡 (*Adinandra nitida* Merr. ex Li)、伞形绣球 (*Hydrangea umbellata* Maxim.)、一年蓬 (*Erigeron annuus* (L.) Pers. Syn. Pl.)、兔儿伞 (*Syneilesis aconitifolia* (Bge.) Maxim.)、黄堇 (*Corydalis amabilis* (Thunb.) Pers. Syn. Pl.)、菝葜 (*Smilax china* L.)、糯米团 (*Gonostegia hirta* (Bl.) Miq.) 等。

2 研究方法

2.1 样地设置及林内环境因子调查

在伏牛山宝天曼自然保护区、罗田大别山、三清山风景区和武夷山国家级自然保护区选择典型的香果树种群为研究对象，每个分布区设置一个 $20\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的样地 (因香果树大多分布于溪流沿岸以及山地沟谷的狭长地带，故设此样地) 进行群落生态学调查。采用照度计 (ZDH-10) 测定林内光照、通风干湿温度计 (DMH2) 记录林内的温湿度、便携式土壤水分速测仪 (TRIME-TD RZ) 测定土壤含水量、ZD-2 型电位滴定计测定土壤 pH 值、重铬酸钾- H_2SO_4 容量法测定土壤有机质，所有数据每样地重复测定 5 次。此外，调查样地内砍伐、放牧等人为干扰情况 (强度最大赋值为 1，最小为 0，不同样地干扰强度值根据调查结果予以赋值^[23])；调查林内土壤厚度、砾石覆盖率、枯落物盖度、枯落物厚度、腐殖质厚度等。主要环境因子详见表 1。

2.2 根萌苗生长特征统计

2010 年 4 月，于每样地选择 40 株生长良好的香果树母树 (胸径 18 cm，树高 13 m，冠幅 6 m)，标记每株母树及各级露根 (选择多年没有萌生苗、仅当年有萌芽的根)，统计其根萌芽的数目；每样地内选取 10 株母树并分别记录根萌苗所在方位 (以正北方为 0° 按顺时针方向旋转计算，下同)、与

表 1 4 个地区不同香果树种群样地概况
Table 1 General situation of *Emmenopterys henryi* populations in different habitats

环境因子 Environmental factors	宝天曼自然保护区 Baotianman Nature Reserve	罗田大别山 Dabie Mountains in Luotian County	三清山风景区 Sanqingshan scenic area	武夷山国家级自然保护区 Wuyishan National Nature Reserve
海拔 Altitude (m)	714	820	930	1283
林内光照 Light intensity (lx)	1013	985	1175	1220
大气温度 Mean air temperature (℃)	16.3	14.5	13.5	13.8
大气湿度 Annual mean humidity (%)	58	66	63	75
土壤含水量 Soil water content (%)	35	61	68	65
土壤有机质 Soil organic matter (%)	1.4	2.1	1.8	2.3
土壤 pH 值 Soil pH value	6.8	6.8	6.5	6.6
土壤厚度 Soil thickness (cm)	10	25	23	28
土壤砾石率 Gravel coverage (%)	77	76	85	72
人为干扰 Artificial interference	0.2	0.1	0.2	0.3

注：林内光照、温湿度等的测定于 2010 年 4 月 1–3 日进行，于每日 10:00、13:00、15:00 时进行测定。
Note: Light intensity under the canopy, temperature and humidity were determined on April 1–3 2010, at 10:00, 13:00 and 15:00 each day.

母树树干间的距离、萌生根萌苗的露根长度和直径，于 2010 年 11 月观测记录每株根萌苗的苗高、基径、冠幅等形态指标。

2.3 根萌苗存活与生长情况调查

2010 年 5 月—2013 年 11 月，于每年的 5 月、8 月和 11 月进行野外观测记录。每样地随机选取有露根的 20 株香果树母树，其中 10 株用于调查其露根的根萌苗苗高和基径，另外 10 株用于调查母树冠幅内外根萌苗的存活率，并记录每株根萌苗在母树树冠下的方位和与母树树干之间的距离。将 2010 年观测记录的根萌苗记作 1a 根萌苗，于 2011 年观测记录的根萌苗记为 2a 根萌苗，以此类推。

2.4 数据统计

2.4.1 根萌苗生长特性指标的统计分析

按根萌苗所处的方位、与母树之间的距离、露根的直径和长度 4 个指标统计数据，计算根萌苗的数量、距离冠幅比(计算公式为：根萌苗距离冠幅比 = 根萌苗与母树树干的距离 / 母树树冠的半径)及根萌苗形态特征指标(苗高、基径和冠幅)的平均值。采用 SPSS 19.0 进行方差分析和多重比较，通过拟合方程获得回归曲线并采用 *F* 检验方法检验其差异显著性，最后用 Origin 9.0 绘图。

2.4.2 影响根萌苗生长的环境因子主成分分析

对影响香果树根萌苗生长的主要环境因子进行统计，并采用 SPSS 19.0 进行主成分分析。

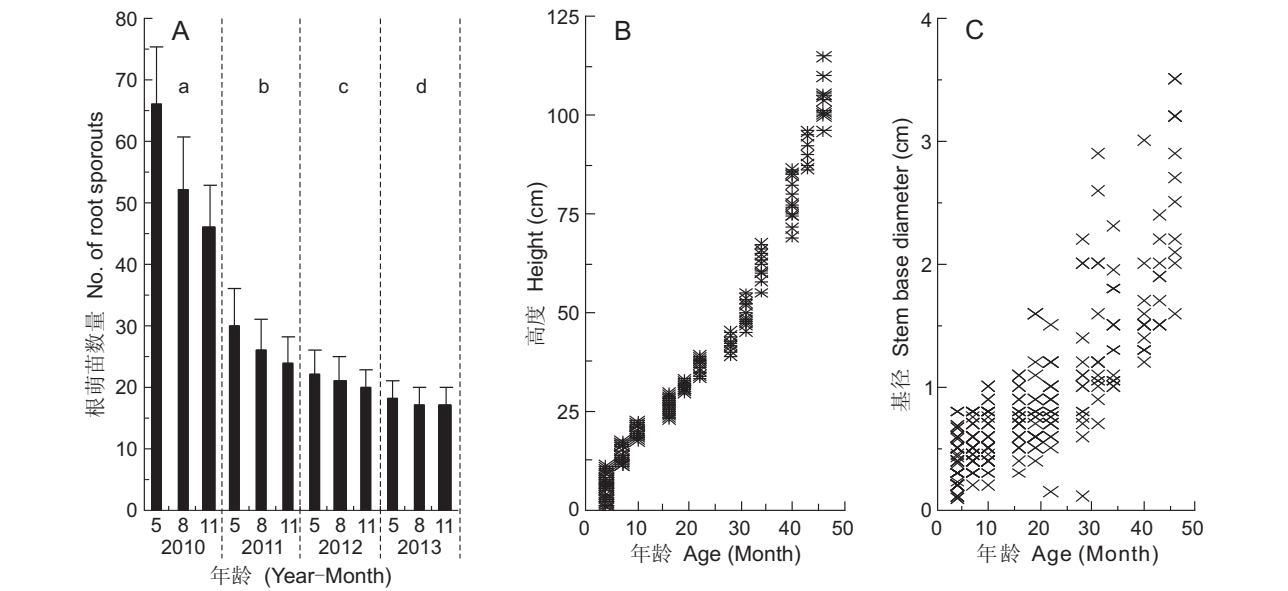
3 结果与分析

3.1 根萌苗年龄结构及其生长动态

研究结果显示，2010 年 5 月—2013 年 11 月调查期间，香果树根萌苗随着年龄的增加数量逐渐减少(图 1: A)，1a 根萌苗死亡率最高，达 30.30%；4 a 根萌苗死亡率最低，为 5.56%；对不同年龄的根萌苗数目进行方差分析，发现不同年龄的根萌苗存活数量之间存在极显著差异(表 2)；LSD 多重比较也表明，4 年间幼苗存活数量差异极显著($P_{2010-2011} = 8.32 \times 10^{-17}$ 、 $P_{2011-2012} = 1.01 \times 10^{-10}$ 、 $P_{2012-2013} = 2.31 \times 10^{-9}$)；香果树根萌苗数量与苗龄之间呈显著负相关，其拟合方程为： $y = 79.36x^{-0.6653}$ ($R^2 = 0.97$)。根萌苗苗高和基径均随苗龄的增加呈指数增长，其中苗高变化曲线为 $y = 4.79e^{0.0089x}$ ($R^2 = 0.93$)，基径变化曲线为 $y = 0.39e^{0.0054x}$ ($R^2 = 0.61$)，二者均达到极显著正相关，较好地反映了根萌苗的生长规律(图 1: B、C)。

3.2 根萌苗生长位置的分布规律

对不同样地香果树母树根萌苗数量进行方差分析，结果显示，母树下不同方位生长的根萌苗、距母树树干不同距离处生长的根萌苗、不同直径和长度的露根所产生的根萌苗的数量间均存在极显著差异($P < 0.01$ ，表 3)。如图 2 所示，香果树根萌苗的萌发位置具有明显的规律性，在母树西北向(320°)



A: 年龄结构; B: 苗高; C: 基径。a, b, c, d 表示在 0.05 水平上的差异显著性。
A: Age structure; B: Height; C: Stem base diameter of root sprouts. a, b, c, and d represent significant difference at the 0.05 level.

图 1 香果树根萌苗生长特性
Fig. 1 Growth characteristics of root sprouts of *E. henryi*

表 2 香果树根萌苗存活数量的方差分析
Table 2 One-way ANOVA of the surviving root sprouts of *E. henryi*

变异来源 Sources of variation	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	F 临界值 F crit
年间 Between years	25811.36	3	8603.79	186.10	3.65×10^{-44}	3.96
年内 Within year	5362.967	116	46.23			
总变异 Total	2814.917	119				

的根萌苗数量最少，平均只有 0.6 株；随着位置由母树西北方位向东南方位移动，根萌苗数量逐渐增多，在东南方位 120°~150°时根萌苗数量最多(图 2: A)；经拟合获得 GaussAmp 回归曲线 $y = 1.16 + 2.56 \exp\left(-\frac{(x-139.30)^2}{7890.19}\right)$ ，母树树冠下的方位与其所生长的根萌苗数量之间存在极显著相关关系。露根与母树树干的距离对根萌苗的数量也产生一定的影响(图 2: B)，当露根离母树距离 0~4 m 时，根萌苗数量较多(达 7.45 ± 1.23 株)；当露根距母树的距离超过 4 m 时，根萌苗的数量显著下降至 13%左右；对离母树树干距离小于 4 m 和大于 4 m 的根萌苗数量进行比较分析，结果显示二者差异极显著($P = 6.34 \times 10^{-7} < 0.01$)。随着母树露根直径和露根长度的增加，根萌苗数量呈先迅速上升后缓慢下降趋势(图 2: C、D)，即

Lognomal 曲线趋势；母树露根直径 2 cm、长度 30 cm 时根萌苗数量最多($10.80 \pm 4.24 \sim 12.60 \pm 2.75$ 株)；而当露根直径大于 6 cm、长度大于 50 cm 时根萌苗的数量最少(只有 1 株左右)。

3.3 根萌苗所处位置对其性状的影响

对香果树根萌苗不同形态指标的方差分析结果表明，香果树母树不同方位及不同直径和长度的露根上生长的根萌苗苗高、基径和冠幅 3 个形态指标均存在极显著差异，其 F 值远大于 F 检验临界值，或 P 值远小于 0.01(表 4)。

从图 3: A 可见，与基径和冠幅相比，香果树根萌苗处于母树方位对苗高的影响较小，但 LSD 多重比较发现，除母树下 326.25°和 348.75°两个方位的根萌苗形态指标间无显著差异外($P_{326.25^\circ-348.75^\circ} = 0.095 > 0.05$)，其余方位下生长的根萌苗形态指标间均存在极显著差异。在母树下

表 3 母树不同方位及露根的香果树根萌苗数量方差分析

Table 3 ANOVA of *E. henryi* root sprouts at different positions from the mother tree and different exposed roots

指标 Indices	F 值 F value	P 值 P value	F 临界值 F crit	总自由度 Total degrees of freedom (<i>df</i> _T)	组间自由度 Degrees of freedom between group (<i>df</i> _I)	组内自由度 Degrees of freedom within group (<i>df</i> _e)
母树方位 Mother tree direction (°)	12.65	1.25 × 10 ⁻¹⁹	1.74	159	15	144
离母树的距离 Distance from mother tree (cm)	67.98	2.01 × 10 ⁻⁵⁰	1.80	139	13	126
露根直径 Diameter of exposed root (cm)	60.18	1.98 × 10 ⁻⁵⁸	1.74	159	15	144
露根长度 Length of exposed root (cm)	26.70	1.35 × 10 ⁻⁴⁶	1.95	219	21	198

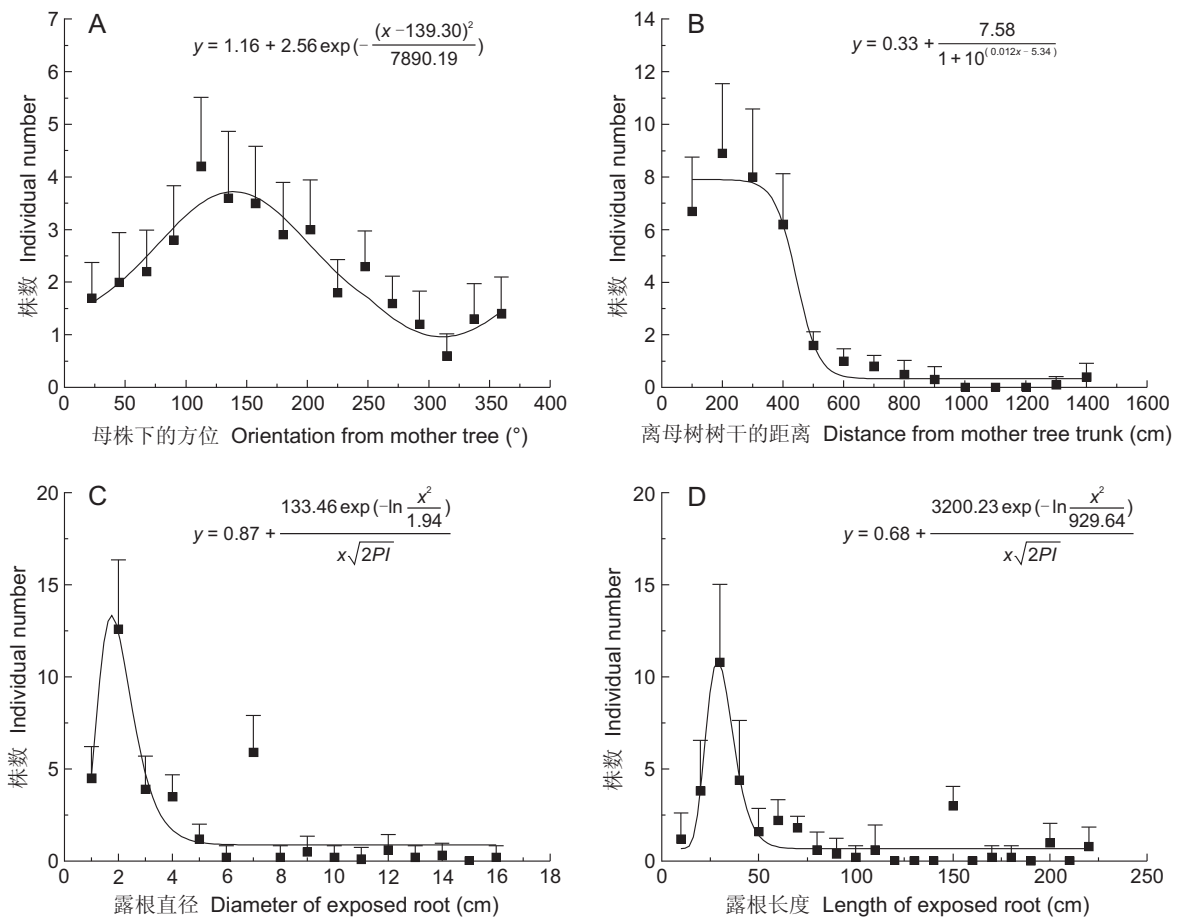


图 2 根萌苗的生长位置、露根直径和长度对根萌苗数量的影响

Fig. 2 Changing numbers of *E. henryi* root sprouts affected by locations and characteristics of exposed roots

168.75°方位所生长的根萌苗基径约为其它方位的 2.5 倍，即母树南面生长的根萌苗基径最大，且随着向北移动根萌苗基径逐渐减小。香果树幼苗的冠幅在母树东面和西面分别达到最大值 (3.27 ± 0.95 cm、5.37 ± 1.47 cm)，而南面较低，即母树南面的根萌苗树冠较小、基径较大，东、西面根萌苗冠幅较大、基径较小，这表明香果树根萌苗对林下光照比

较敏感，东、西面的根萌苗通过增大冠幅以捕获更多的光照。母树北面的根萌苗基径较小、冠幅也较小，可能是环境因子对其生长的抑制所致。

根萌苗的基径和冠幅随着与母株距离的增大而逐渐减小(图 3: B)，这可能是由于香果树根萌苗随着与母树距离的增加其获得的营养和水分逐渐减少，从而导致其形态指标逐渐降低。根萌苗苗高受

表 4 香果树根萌苗不同形态指标的方差分析
Table 4 One-way ANOVA of different morphological indices of *E. henryi* root sprouts

指标 Indices	苗高 Height			基径 Stem base diameter			冠幅 Crown breadth		
	F 值 F value	P 值 P value	F 临界值 F crit	F 值 F value	P 值 P value	F 临界值 F crit	F 值 F value	P 值 P value	F 临界值 F crit
母树下方位 Orientation from mother tree (°)	46.52	1.62×10^{-47}	2.17	50.43	1.38×10^{-49}	2.17	55.66	5.94×10^{-50}	2.18
离母树的距离 Distance from mother tree (cm)	11.37	8.15×10^{-15}	2.34	44.05	1.11×10^{-37}	2.34	120.93	5.73×10^{-60}	2.34
露根直径 Diameter of exposed root (cm)	44.35	1.77×10^{-43}	2.22	22.62	8.69×10^{-29}	2.22	22.12	2.41×10^{-28}	2.22
露根长度 Length of exposed root (cm)	10.07	1.01×10^{-19}	2.01	18.66	4.89×10^{-33}	2.01	25.74	1.85×10^{-41}	2.01

注：表中各指标自由度同表 3。
Note: Degrees of freedom of different indices in the Table are the same as in Table 3.

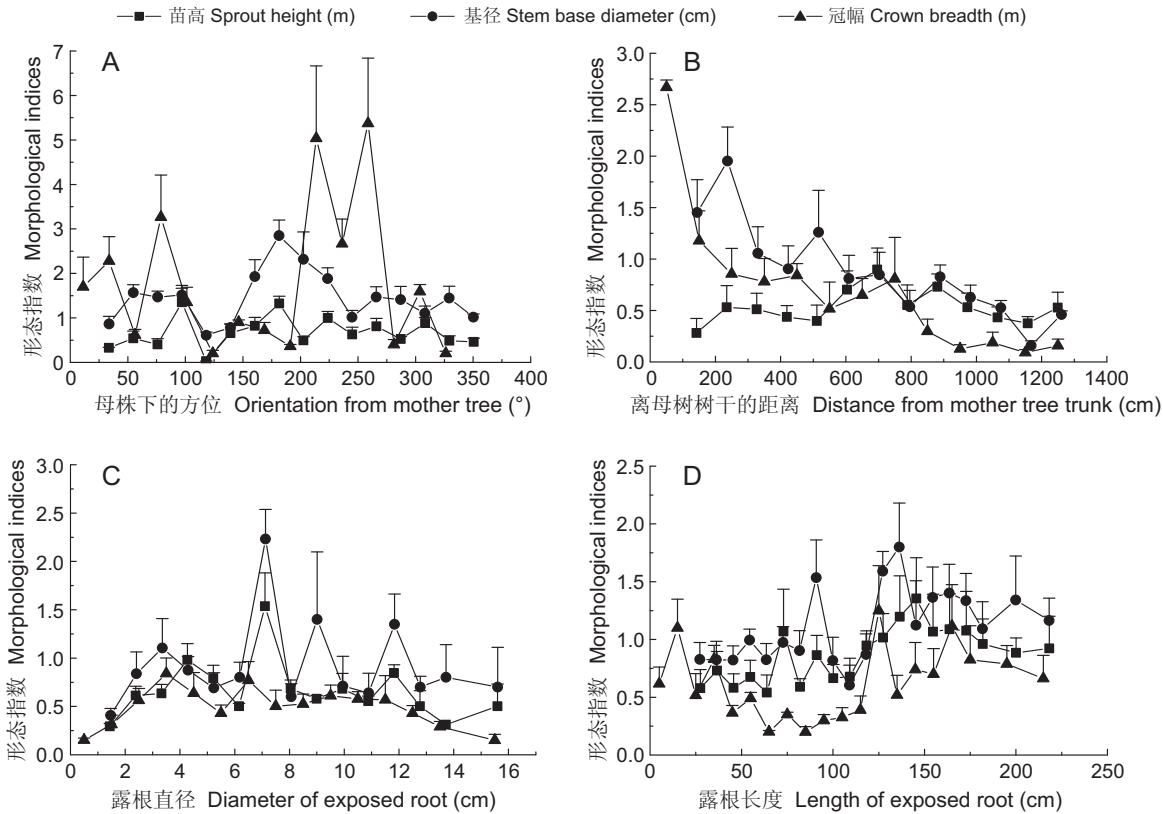


图 3 根萌苗的生长位置、露根直径和长度对根萌苗特性的影响

Fig. 3 Morphological indices of *E. henryi* root sprouts affected by locations and characteristics of exposed roots

与母树的距离影响较小，距母树 6.5 m 处根萌苗苗高显著高于其它根萌苗的苗高 ($P_{6.5\text{ m}-\text{其它均值}} = 5.55 \times 10^{-7}$)。

露根的直径对其根萌苗的形态指标具有显著影响(表 4)，且随着露根直径的增加香果树根萌苗的各项指标均有所增加，当露根直径达到 6.5 cm 时，其根萌苗的苗高和基径均达到最大值 (1.53 ± 0.35 cm、 2.23 ± 0.31 cm)，随后缓慢降低(图 3: C)。当露根直径 < 3.5 cm 时，根萌苗的冠幅

逐渐增加，达 3.5 cm 后总体表现出下降的趋势。

随着露根长度的增加，根萌苗冠幅、基径和苗高均表现出相似的变化趋势(图 3: D)。当露根长度小于 115 cm 时，各形态指标均随着露根长度的增加而逐渐降低，之后迅速上升，在根长达 125 cm 时各形态指标均达到最大值，随后逐渐降低并趋于平缓。

3.4 母树树冠下不同位置对根萌苗存活数量的影响

研究结果发现，香果树根萌苗大多位于母树树

冠以内 (263 株), 而树冠以外的根萌苗数量较少 (104 株), 仅占根萌苗总数的 28. 33% (图 4)。由表 5 可知, 随着根萌苗苗龄的增大, 其死亡率逐渐降低, 且树冠外根萌苗的死亡率显著高于树冠内 ($P_{冠内-冠外} = 0. 02 < 0. 05$), 这表明树冠内外环境差异对树冠下根萌苗存活率的影响达显著水平。至调查实验结束时 (2013 年 5 月), 距母树 2 倍冠幅以外的根萌苗已全部死亡。

3. 5 影响根萌苗的数量及其生长的环境因素

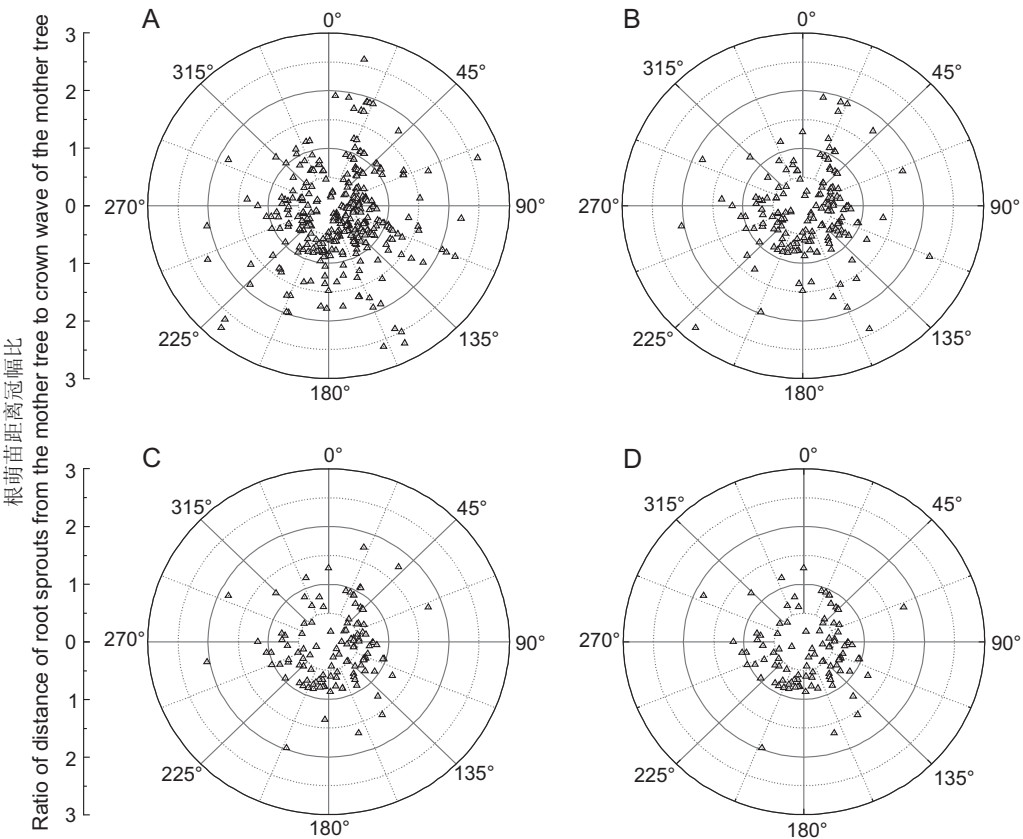
对香果树生存环境中主要的环境因子进行了主成分分析 (表 6), 结果显示前 3 个主成分的贡献率分别为 53. 59%、27. 30%、19. 11%。其中, 第一主成分中的光照因子 (负荷量 0. 97) 和土壤因子 (土壤厚度负荷量为 -0. 96, 土壤有机质为 0. 90, 砾石覆盖率为 0. 88) 对香果树根萌苗的数量影响最大; 第二主成分中的人为干扰因子 (0. 95) 和海拔因子 (0. 87) 对香果树的影响次之, 适度的人为干

扰可形成断桩、断根、伤根等, 刺激根萌苗产生并增加林内光照, 有利于根萌苗的产生和生长。

4 讨论

4. 1 自然生境中香果树的繁殖方式

自然环境下香果树有性繁殖率较低^[7], 母树一般 2-4 年开花 1 次, 开花量大但结实率极低, 存在花多果少的现象^[24]; 且种子发芽率较低^[12], 极易腐烂^[25], 即实生苗的自然更新繁殖受到严重抑制, 因此萌生苗更新对其种群稳定具有重要的作用。野外调查发现, 香果树大多生长于溪流边, 基质中存在大量砾石, 部分根系无法扎入土壤而暴露于空气中, 这为根萌苗的产生提供了条件。香果树根萌苗可通过露根吸收母树的养分进行生长, 随着根萌苗自身根系的发育完善、抵抗力逐渐增强, 还可经由露根与母树进行物质交换和营养运输, 共同利用生境中的营养物质。香果树在不利于其实生繁



A: 1a 根萌苗; B: 2a 根萌苗; C: 3a 根萌苗; D: 4a 根萌苗。
A: 1-year-old root sprouts; B: 2-year-old root sprouts; C: 3-year-old root sprouts; D: 4-year-old root sprouts.

图 4 母树树冠下不同位置对根萌苗存活数量的影响

Fig. 4 Effects of different locations under the mother tree crown on the survival of root sprouts

表 5 母树树冠内外香果树根萌苗存活数量的差异
Table 5 Differences in survival numbers of root sprouts outside and inside the mother tree crown

调查时间 Time (year)	冠内 Inside mother tree crown		冠外 Outside mother tree crown	
	存活数量 Survival number	死亡率 Mortality (%)	存活数量 Survival number	死亡率 Mortality (%)
2010	263	—	104	—
2011	133	49.43	35	66.35
2012	100	24.81	19	45.71
2013	83	17.00	13	31.58

表 6 影响香果树根萌苗生长的环境因子的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of the environmental factors influencing the characteristics of the *E. henryi* root sprouts

环境因子 Environmental factors	主成分 Principal component		
	1	2	3
林内光照 Light intensity (lx)	0.97	-0.17	-0.18
土壤厚度 Soil thickness (cm)	-0.96		-0.27
土壤有机质含量 Soil organic matter content (%)	0.90	0.35	-0.26
土壤砾石率 Gravel coverage (%)	0.88		0.46
土壤含水量 Soil water content (%)	-0.85	0.52	
大气温度 Mean air temperature (°C)	0.73	-0.69	
人为干扰 Artificial interference		0.95	-0.32
海拔 Altitude (m)	-0.48	0.88	
大气湿度 Annual mean humidity (%)			0.99
土壤 pH 值 Soil pH value	-0.63	-0.41	0.66
累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	53.59	80.89	100.00

殖的生境中，利用根萌苗作为种群更新的一种途径，可迅速补充幼苗和幼树数量，是一种打破种群更新瓶颈的有效策略。尽管根萌苗代替实生苗可维持种群数量，迅速恢复与完善种群的结构和功能、降低丧失遗传多样性的风险^[26]，但若种群更新长期依赖萌生苗，则势必会导致遗传多样性的单一，使种群整体活力下降，群落稳定性降低，从而加速种群灭亡。因此，加强对原生境下香果树实生苗更新过程及种子萌发影响因素的研究，对促进香果树种群的自然更新，维持其遗传多样性以及提高其对环境的适应能力具有重要意义。

4.2 香果树根萌苗的生长及数量特征

随着苗龄的增加，香果树根萌苗死亡率逐渐下

降，1a 根萌苗死亡率最高，达 30.30%，4a 根萌苗死亡率最低，为 5.56%(图 1)。根萌苗苗高和基径随苗龄的增加均呈指数增长，同一龄级根萌苗苗高的变异较小，基径则变异较大，究其原因可能是根萌苗在母树树冠下所处的位置不同致使其从母树获得的养分和水分有所差异。康华靖等^[12]研究发现，大田培育的香果树实生苗在其生长期内苗高每个月可增加 1 cm 左右，而在本研究中香果树根萌苗平均每个月增长超过 2 cm，由此可见，与实生苗相比，根萌苗表现出更强的竞争力。

本研究结果与濒危植物櫻桃李 (*Prunus divaricata* Ehrhart)^[27]的更新原理相似，但櫻桃李的根萌苗仅能在距母树树干 0.2~1.6 m 处存活。本文香果树的根萌苗最远可生长在距母树树干 12.5 m 处，但大部分根萌苗集中分布于距母树树干 <4 m 的范围内；在母树的东南方向，直径 <4 cm、长度 <60 cm 的露根上产生的根萌苗数量相对较多。香果树根萌苗各形态指标的增长与根萌苗所生长的位置有关：母树南面的根萌苗基径最大，母树西面根萌苗的冠幅最大；随着距母树树干距离的增加，根萌苗的各形态指标均呈下降趋势。露根直径为 6.5 cm 时，其上产生的根萌苗各形态指标最大。71.67%的香果树根萌苗由树冠内的露根产生，只有较少部分的根萌苗产生于冠外的露根。随着年龄的增加，根萌苗死亡率逐渐降低，且冠外根萌苗死亡率显著高于冠内，这可能是由于距香果树母树较远不利于其营养物质的获取所致^[7]，同时，冠内外的光照条件不同也可能会影响其生长。

本研究中母树东南面的根萌苗数量较多，可能是由于母树东南面光照条件较好，土壤温度和空气温度均较高，有利于根萌苗幼苗的产生、生长及存活。颜培玲等^[28]研究了光叶楮 (*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent.) 根的繁殖技术，发现根段直径越大其根萌苗的数量越多，而本研究结果却有所不同，即直径为 2 cm 的露根产生的根萌苗数量最多，直径小于或大于 2 cm 的露根上所产生的根萌苗数量则迅速减少，这可能是由于香果树直径超过 2 cm 时其露根开始产生次生结构，根周皮逐渐加厚，导致不定芽原基在形成层部位很难形成，从而

减少了萌芽数量；而小于2 cm的露根由于其发育尚未完善，萌蘖能力较弱。

4.3 香果树保护策略

光照在植物自然更新过程中具有重要作用^[22]。有研究表明，光照不足将导致实生苗生长缓慢，在与其它物种的竞争中处于劣势，极易被淘汰^[29]。同样，香果树通过实生苗繁殖更新也受到抑制^[24]，根萌苗为其自然更新提供了另一条途径。但根萌苗的产生也受到多种环境因子的影响，主成分分析表明，光照、土壤有机质含量、砾石覆盖率等均对香果树根萌苗的生长影响较大。因此，适当疏伐、间伐高层林木以增加林下光照，清理林下灌草以减少草本层及枯落物等对根萌苗的遮蔽，在原生境建立苗圃进行人工育苗，这些措施将有利于促进香果树种群的自然更新。

另外，本研究中发现少部分靠近茶园的香果树人为破坏较严重，导致这些香果树母树的露根出现断根和残根，与完好的露根相比，被破坏的露根上萌蘖出的幼苗数量更多，这一现象为我们进一步研究该物种的更新策略提供了新的启示，适度的人为干扰对根萌苗的产生和生长的影响及其作用机理还有待深入研究。

参考文献：

- [1] 韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 615-619.
- [2] Szwagrzyk J, Szewczyk J, Bodziarczyk J. Dynamics of seedling banks in beech forest: result of a 10-year study on germination, growth and survival [J]. *For Ecol Manag*, 2001, 141 (3): 237-250.
- [3] Silva MG, Marcelo T. Seed dispersal, plant recruitment and spatial distribution of *Bactris acanthocarpa* Martius (Arecaceae) in a remnant of Atlantic forest in north-east Brazil [J]. *Acta Oecol*, 2001, 22(5): 259-268.
- [4] Parrish JAD, Bazzaz FA. Ontogenetic niche shifts in old-field annuals [J]. *Ecology*, 1985, 66(4): 1296-1302.
- [5] 康华靖, 陈子林, 刘鹏, 郝朝运, 韦福民. 大盘山自然保护区香果树种群结构与分布格局[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 389-396.
- [6] 于永福. 中国野生植物保护工作的里程碑——《国家

- 重点保护野生植物名录(第一批)》出台[J]. 植物杂志, 1999, 5(3): 3-11.
- [7] 郭连金. 濒危植物香果树(*Emmenopterys henryi*)种群结构与动态[J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(5): 509-514.
- [8] 王万强, 李霞, 王瑾. 香果树濒危原因与保护[J]. 中国林业, 2008 (1A): 46.
- [9] 潘德权, 陈景艳, 李鹤, 高亮, 邓伦秀. 香果树实生苗培育技术及苗木质量分级[J]. 种子, 2014, 33(4): 113-115.
- [10] 李中岳, 班青. 香果树的生物学特性与繁殖方法[J]. 林业科技开发, 1995(4): 37-38.
- [11] 杨开军. 稀有植物香果树的保护生物学初步研究[D]. 安徽芜湖: 安徽师范大学, 2007: 27.
- [12] 康华靖, 陈子林, 周钰鸿, 权伟, 巫丽华, 厉启腾. 濒危植物香果树种子萌发及幼苗生长动态的比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(1): 32-37.
- [13] 徐小玉, 姚崇怀, 潘俊. 湖北九宫山香果树群落结构特征研究[J]. 西南林学院学报, 2002, 22(1): 5-8.
- [14] 彭焱松, 张晓波, 桂忠明, 杜娟, 周赛霞. 庐山香果树毛竹混交林空间格局研究[J]. 广西植物, 2013, 33(4): 502-507.
- [15] 康华靖. 大盘山自然保护区濒危植物香果树群落生态学的研究[D]. 浙江金华: 浙江师范大学, 2008: 15-20.
- [16] 俞惠林. 香果树扦插育苗试验研究[J]. 安徽林业科技, 2005, 126(3): 15-16.
- [17] 魏亚平. 郭占胜. 香果树埋根育苗试验初探[J]. 现代园艺, 2009(9): 49-50.
- [18] 徐杏阳. 洪树荣. 吴立廉. 香果树叶外植体诱导植株再生[J]. 植物学通报, 1983, 1(1): 40-43.
- [19] 韦小丽, 朱忠荣, 廖明, 金天喜. 香果树组织培养技术研究[J]. 种子, 2006, 24(10): 27-29.
- [20] 朱从波, 王万里, 刘晓静, 李丹丹, 朱学灵, 姚松, 田野. 宝天曼自然保护区珍稀濒危植物研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(16): 9467-9470.
- [21] 方元平, 项俊, 胡扬, 付德安. 鄂东大别山区香果树资源现状及其保护[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6): 1756-1757.
- [22] 郭连金, 贺昱, 徐卫红. 三清山濒危植物天女花种群生殖对策研究[J]. 植物科学学报, 2012, 30(2): 153-160.

[23] 张文辉, 王延平, 康永祥, 刘祥君. 濒危植物太白红杉种群年龄结构及其时间序列预测分析[J]. 生物多样性, 2004, 12(3): 361-369.

[24] 郭连金, 林国卫, 徐卫红, 王艾平. 武夷山香果树自然种群生殖构件特性研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 18-22.

[25] 李铁华, 周佑勋, 段小平, 杜正涛. 香果树种子休眠和萌发的生理特性[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(2): 83-84.

[26] 杨旭, 杨志玲, 雷虢, 陈慧, 麦静. 濒危植物凹叶厚朴幼苗更新及环境解释[J]. 林业科学, 2013, 49(12): 36-42.

[27] 李海冰, 刘影, 塔西买买提·马合苏木, 赵玉, 吕督康. 新疆濒危野生櫻桃李幼苗的自然分布特征[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(9): 1612-1619.

[28] 颜培岭, 张敏, 蒋泽平, 乔其川. 光叶楮根繁殖技术初探[J]. 江苏林业科技, 2008, 35(3): 43-46.

[29] 伍泽文. 杉木、厚朴混交林邻体干扰效应研究[J]. 河南科技大学学报, 2004, 24(4): 63-66.

(责任编辑: 张 平)