

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.05.006

重庆常见园林树木异速生长关系随发育的变化

赵园园^{1,2}, 王海洋²

1. 北京师范大学 生命科学学院/生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715

摘要: 研究茎、叶性状间的异速生长关系有助于加深理解植物在生长发育过程中茎、叶之间的资源分配模式。以重庆主城区 14 种常见的园林树木为对象, 分析不同物种和生活型间茎干质量与叶柄、叶片干质量和叶面积、叶片干质量与叶柄干质量、叶面积间的异速生长关系, 定量分析其不同发育阶段的变化。结果表明: ① 在物种水平上, 茎、叶性状间的异速生长关系在不同发育阶段差异具有统计学意义。新生期茎干质量的增加速度小于叶柄干质量、叶片干质量及叶面积的增加速度, 花期保持同速增长, 果期前者增加速度超过了后者; 新生期和花期叶片干质量的增加速度远大于叶柄干质量和叶面积的增加速度, 果期保持等速增长。② 在生活型水平上, 常绿植物茎干质量与叶柄干质量、叶片干质量和叶面积间 SMA 斜率不随发育阶段改变, 而落叶植物茎、叶性状间 SMA 斜率随发育阶段发生明显改变; 随发育历程的改变, 常绿植物叶片干质量的增加速度逐渐小于叶柄干质量增加速度, 逐渐大于叶面积增加速度, 而落叶植物叶片干质量的增加速度始终大于叶柄干质量的增加速度, 逐渐等于叶面积的增长速度。这些结果揭示了植物茎叶性状的资源利用策略在不同发育阶段发生转变。

关键词: 异速生长; 发育历程; 枝叶性状; 生活型

中图分类号: Q948.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)05-0046-10

植物功能性状间的权衡关系为异速生长是普遍存在的规律^[1], 植物在生长发育的过程中, 不断改变对资源的利用策略以适应环境变化^[2], 从而导致了不同性状间的相对生长速率出现差异^[3]。关于异速生长的研究主要集中在生物量分配^[2], 生物量是绿色植物通过同化器官的光合作用在单位面积内积累的有机质和能量, 如何有效地分配生物量对于物种的生存和繁殖有巨大的作用^[4-5]。异速生长的速率受遗传特性、环境因子和个体大小的影响^[6]。此外, 生物量分配对环境变化的响应程度与植物的生态学特征有关^[7], 因此, 对于植物异速生长关系的研究有利于更好地理解植物适应性^[2, 8], 在生态学中具有重要的意义。

植物功能性状一般指影响植物存活、生长和繁殖的性状, 其属性能够单独或联合指示植物生长发育的信息及对环境变化的响应^[9]。由于木本植物乃构件生物, 一年生枝条即为其构件。它是植物体上最有活力的部分, 其上着生叶、花和果实, 研究它的结构和资源分配是植物生活史研究的重要内容之一^[10]。其中, 叶性状最能反映植物生长发育状态。叶片通过光合作用进行物质生产, 叶面积、叶干质量的增加意味着植物获取的物质和能量增多, 叶柄具有支持叶片、输导水分和营养物质的作用^[7, 11]; 此外, 茎具有物理支持、保存水分及养分的功能^[12]。植株是由相互作用的源(叶片)和汇(茎、根和果实)组成的系统, 源通过韧皮部

收稿日期: 2020-03-29

基金项目: 重庆市科学技术局技术创新与应用示范重点项目(cstc2018jscx-mszdX0069)。

作者简介: 赵园园, 硕士研究生, 主要从事植物生态研究。

运输提供光合产物,汇通过竞争获得光合产物^[13],各个构件之间并不是独立进化的,而是存在一定的权衡关系.因此,对于枝条异速生长关系的研究可以从茎性状和叶性状的水平上入手.

目前,已有学者围绕一年生枝条异速生长关系开展过研究,大部分研究发现,植物叶片干质量、叶面积与叶柄干质量间呈显著的异速生长关系^[14],由于“回报递减”的效应,随着叶干质量的增加,叶面积并未成比例地增加^[15-16];茎干质量与叶干质量间也存在异速生长关系^[17].也有研究发现,叶干质量与叶面积、茎干质量虽显著正相关,但具有等速生长关系^[18],且叶干质量大小主要受到茎直径的制约^[19].此外,植物枝叶性状在不同生活型间也有一定的差异.常绿植物与落叶植物相比,一般叶寿命长、比叶质量高、营养成分及水力传导性低^[4],具有更强的抗寒和抗栓塞和气穴现象的能力,对茎和叶柄的投入较高^[20].然而,不同生活型间如何分配相同的资源,其异速生长关系在不同发育阶段的变化是否一致,这种变化是异速生长造成的表型差异,还是因为不同发育阶段植物可利用的资源不同,从而导致的真正可塑性变化呢^[21]?

因此,本文以重庆主城区14种常见园林植物的一年生枝条为对象,研究了不同物种和生活型间常见园林植物在不同发育阶段(新生期、花期和果期)的茎干质量与叶柄、叶片干质量及叶面积、叶片干质量与叶柄干质量、叶面积的异速生长关系,以期了解茎叶干质量的投资方式是否随资源条件的改变而不同,从而有助于理解一年生枝条的生长对策的特点及其意义.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域

研究区域为重庆市主城区(28°27′-30°26′N、105°17′-107°27′E),平均海拔400 m,地形地貌以丘陵山地为主;气候类型为中亚热带湿润季风型气候,年均降水量为1 000~1 200 mm,空气湿度大.采样地点包括南山植物园、歌乐山森林公园、中央公园、园博园、缙云山、西南大学、重庆大学、照母山森林公园、鸿恩寺森林公园、沙坪坝公园、动物园、嘉陵公园、百林公园、歌乐山文化广场和鹅岭公园等15个样地.

1.2 样品采集

以成熟、健康且末端不分枝的一年生枝条、着生完全开放花朵的一年生枝条及着生成熟果实的一年生枝条为研究对象,包括其上的附属物(叶、茎).实际采样中,部分植物的花朵和果实着生在二年生枝条上,也将其包含在本次研究中.实验于2017年10月-2018年10月进行,根据植物物候的差异,分别在植物完成展叶及枝条生长时、花期、果熟期,每个物种随机选择3~6株成熟个体,在植物外冠层东西南北4个方向随机采集4个叶片、花和果实没有明显损伤的枝条,采集后立即放入自封袋,带回实验室测量相关指标.根据常见园林植物分布习性和重庆常见观花观果植物的特性,本次实验共采集植物14种,其中常绿植物4种,包括天竺桂(*Cinnamomum japonicum*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、红花檫木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)、海桐(*Pittosporum tobira*);落叶植物10种,包括红枫(*Acer palmatum*)、海棠花(*Malus spectabilis*)、李(*Prunus salicina*)、紫叶李(*Prunus cerasifera* f. *atropurpurea*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、玉兰(*Yulania denudata* (Desr.) D. L. Fu)、梅(*Armeniaca mume*)、红花碧桃(*Amygdalus persica* var. *persica* f. *rubro-plena*)、紫叶桃花(*Amygdalus persica* var. *persica* f. *atropurpurea*)和桃(*Amygdalus persica*).

1.3 指标测定

将带回的实验材料放在恒温鼓风干燥箱中,在70℃条件下烘干48 h后至恒质量,用FA1004万分之一电子天平测量茎干质量、叶柄干质量和叶片干质量;用透明玻璃盖板压平叶片并采集电子照片,再用Adobe Photoshop CS5和AutoCAD 2010软件计算叶面积.

1.4 数据分析

在数据分析前,对每个一年生枝条的功能性状数据进行对数转换(以10为底),使之符合正态分布.对

分析一年生枝条异速生长关系使用的方程 $y = b \times a$, 在研究前两边取对数, 转化为线性方程 $\lg y = \lg b + a \lg x$, 式中: x 与 y 分别表示一年生枝条功能特征参数; b 代表截距; a 为斜率, 表示异速生长方程的参数 (当 $a=1$ 时, 为等速生长; $a \neq 1$ 时, 为异速生长). 采用标准化主轴估计 (standardized major axis, SMA) 方法估计异速生长方程的参数, 运用软件 (S)MATR Version 2.0 完成, 根据 Pitman 方法计算回归斜率的置信区间. 所有绘图均在 Origin 9.1 软件中完成.

2 结果

2.1 茎干质量与叶柄、叶片干质量及叶面积的生长关系

2.1.1 不同物种枝叶性状的异速生长关系

枝叶性状在新生期和果期均呈极具有统计学意义的相关关系 ($p < 0.001$), 而在花期不相关 ($p > 0.05$, 表 1), SMA 斜率在不同发育阶段均存在有统计学意义的差异 ($p < 0.05$, 图 1). 茎干质量与叶柄干质量 SMA 斜率在新生期显著小于 1 ($p = 0.019$), 花期和果期与 1 均无具有统计学意义的差异 ($p > 0.05$, 图 1a). 茎干质量与叶片干质量、叶面积的 SMA 斜率在新生期均显著小于 1 ($p < 0.001$), 花期与 1 无具有统计学意义的差异 ($p > 0.05$), 果期则显著大于 1 ($p < 0.05$; 图 1b 和图 1c). 表明新生期和果期枝叶性状之间存在具有统计学意义的异速生长关系 (果期茎干质量与叶柄干质量为等速生长关系), 而花期均为等速生长关系.

表 1 一年生枝条的茎干质量与叶柄、叶片干质量及叶面积回归参数

类型	发育阶段	茎干质量—叶柄干质量			茎干质量—叶片干质量			茎干质量—叶面积		
		R^2	k	CI	R^2	k	CI	R^2	k	CI
全部	新生期	0.820	0.849	0.742~0.972	0.900	0.730	0.660~0.808	0.890	0.778	0.700~0.865
	花期	0.007	1.052	0.769~1.439	0.010	-0.888	-1.214~-0.649	0.014	-0.998	-1.364~-0.731
	果期	0.535	1.171	0.944~1.454	0.672	1.304	1.087~1.564	0.717	1.311	1.107~1.553
常绿	新生期	0.822	0.990	0.738~1.327	0.922	0.730	0.600~0.887	0.917	0.722	0.590~0.883
	花期	0.804	0.952	0.700~1.294	0.904	0.852	0.686~1.059	0.882	0.972	0.765~1.236
	果期	0.867	0.758	0.588~0.978	0.953	0.897	0.770~1.046	0.935	0.988	0.826~1.182
落叶	新生期	0.824	0.783	0.666~0.920	0.888	0.713	0.626~0.811	0.869	0.801	0.696~0.921
	花期	0.068	-1.154	-1.662~-0.800	0.345	-1.062	-1.446~-0.781	0.370	-1.038	-1.405~-0.767
	果期	0.426	2.013	1.507~2.688	0.758	1.778	1.471~2.149	0.577	1.628	1.269~2.088

注: CI 表示 95% 置信区间.

2.1.2 不同生活型枝叶性状的异速生长关系

在常绿植物中, 枝叶性状表现出显著的正相关关系 ($p < 0.001$, 表 1). 常绿植物在不同发育阶段的异速生长指数均无具有统计学意义的差异 ($p > 0.05$, 图 2), 茎干质量与叶柄干质量、叶面积的共同斜率分别为 0.882 (置信区间 CI 为 0.744~1.049)、0.780 (CI 为 0.780~1.037), 与 1 均无具有统计学意义的差异 ($p > 0.05$; 图 2a,c); 茎干质量与叶片干质量为 0.746 (CI 为 0.746~0.936), 显著小于 1 ($p = 0.002$, 图 2b). 此外, 果期的 y 轴截距显著大于花期和新生期或沿着共同主轴有显著的向上的位移 ($p < 0.05$), 表明果枝具有更大的茎叶干质量.

在落叶植物中, 除花期的茎干质量与叶柄干质量不相关外, 其余的枝叶性状均存在有统计学意义的相关 ($p < 0.001$; 表 1). SMA 斜率在不同发育阶段均有具有统计学意义的差异 ($p < 0.05$; 图 3), 茎干质量与叶柄、叶片干质量及叶面积的 SMA 斜率在新生期均显著小于 1 ($p < 0.05$), 花期与 1 无具有统计学意义的差异 ($p > 0.05$), 果期则显著大于 1 ($p < 0.05$). 表明新生期和果期枝叶性状之间存在显著的异速生长关系, 而花期均表现为等速生长关系.

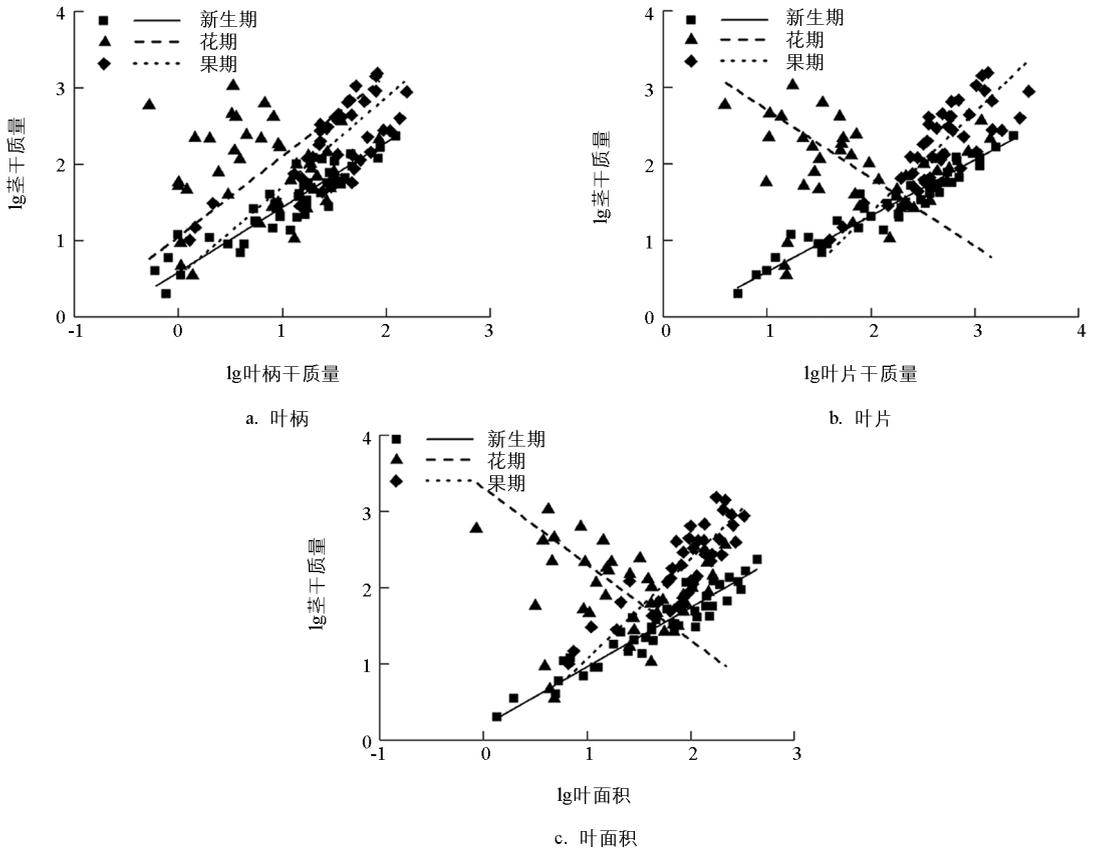


图 1 枝叶性状的生长关系

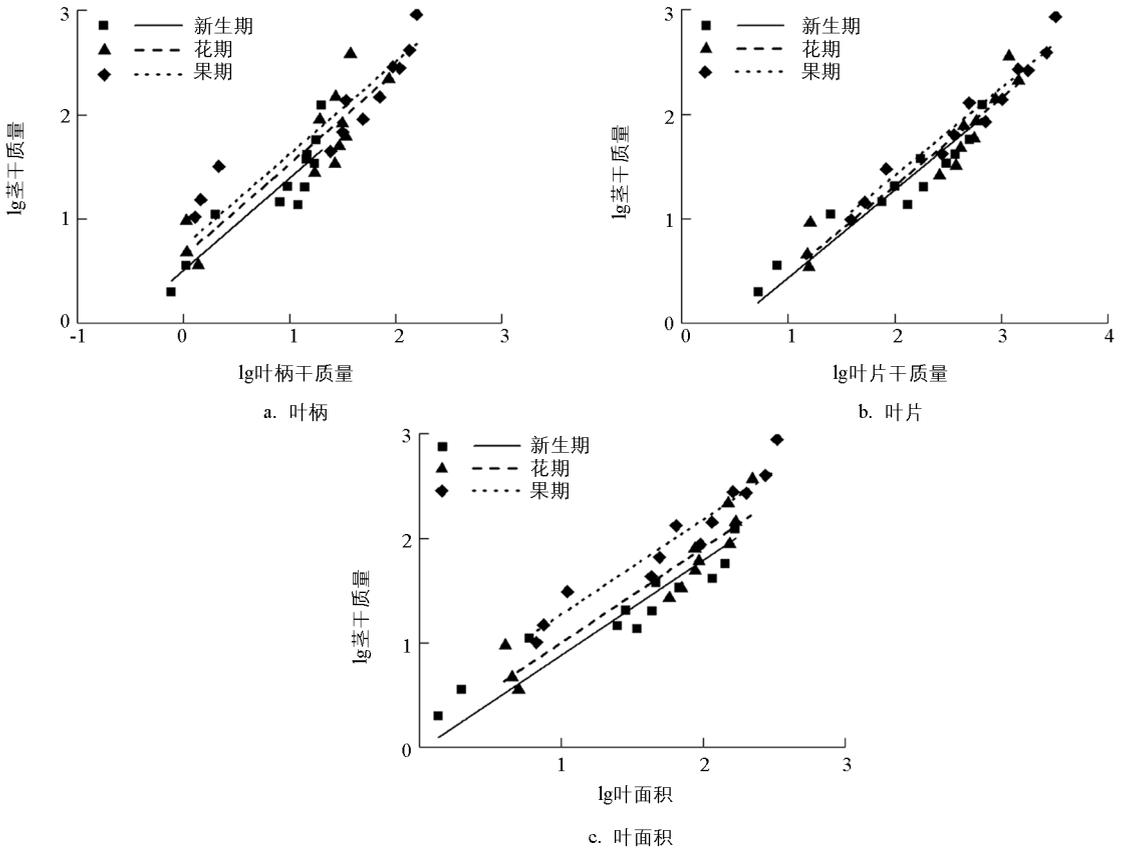


图 2 常绿植物枝叶性状的生长关系

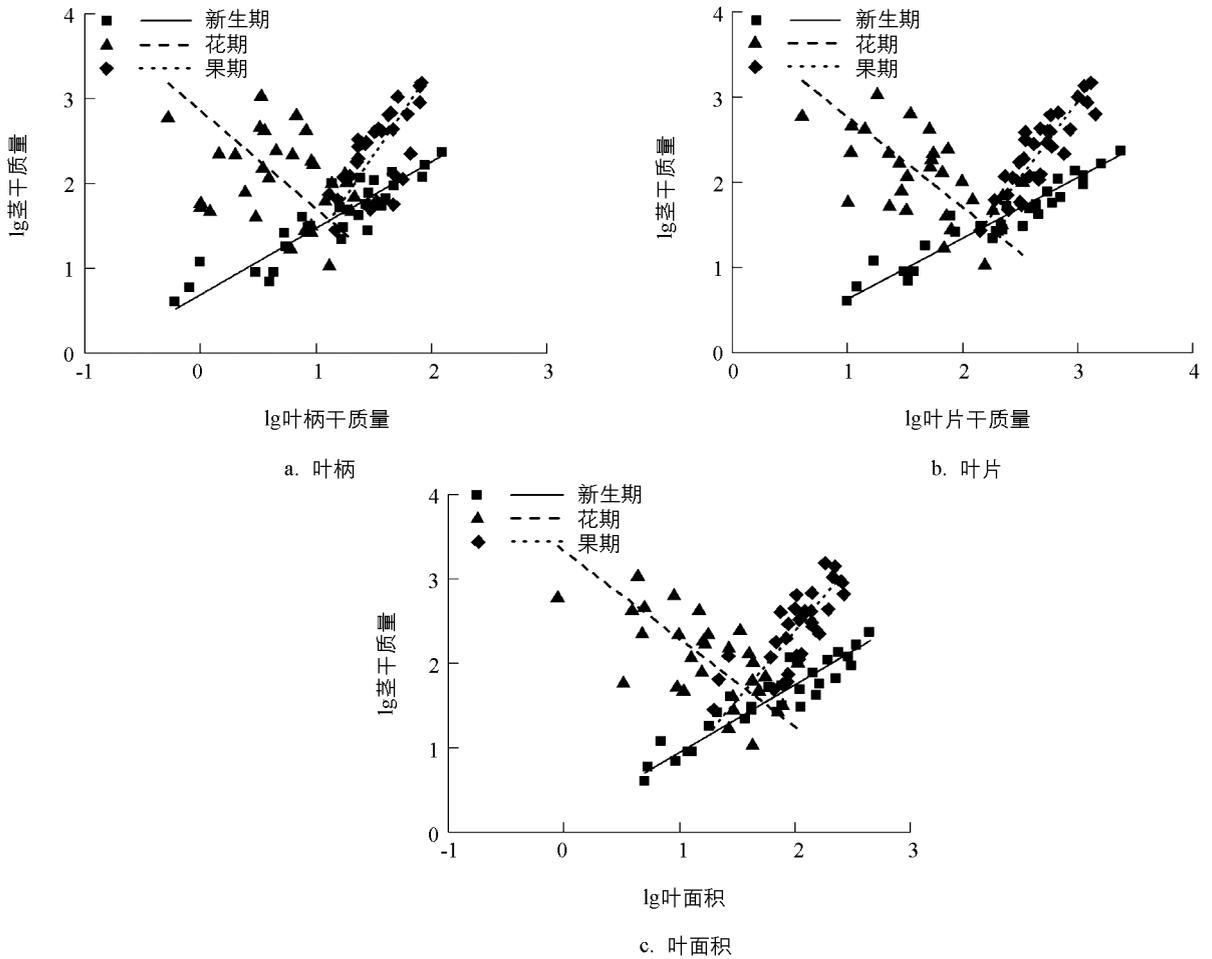


图 3 落叶植物枝叶性状的生长关系

2.2 叶片干质量与叶柄干质量、叶面积的生长关系

2.2.1 不同物种叶性状的异速生长关系

不同物种叶性状间均呈极具有统计学意义的正相关关系($p < 0.001$, 表 2), SMA 斜率在不同发育阶段均存在有统计学意义的差异($p < 0.05$, 图 4). 叶片干质量与叶柄干质量、叶面积 SMA 斜率在新生期和花期显著大于 1($p < 0.05$), 而果期与 1 无明显差异($p > 0.05$). 表明新生期和花期叶片干质量的增加速度远大于叶柄干质量和叶面积的增加速度, 果期的增加速度相似.

表 2 一年生枝条的叶片干质量与叶柄干质量、叶面积回归参数

类型	发育阶段	叶片干质量—叶柄干质量			叶片干质量—叶面积		
		R^2	k	CI	R^2	k	CI
全部	新生期	0.945	1.163	1.079~1.253	0.979	1.066	1.017~1.117
	花期	0.818	1.185	1.034~1.358	0.942	1.125	1.042~1.214
	果期	0.875	0.898	0.803~1.005	0.882	1.006	0.901~1.122
常绿	新生期	0.950	1.356	1.159~1.587	0.995	0.989	0.940~1.040
	花期	0.963	1.117	0.975~1.280	0.983	1.141	1.041~1.250
	果期	0.962	0.845	0.738~0.969	0.997	1.101	1.059~1.146
落叶	新生期	0.951	1.099	1.009~1.197	0.977	1.124	1.060~1.191
	花期	0.666	1.086	0.870~1.356	0.940	0.977	0.889~1.074
	果期	0.721	1.132	0.924~1.387	0.844	0.915	0.786~1.066

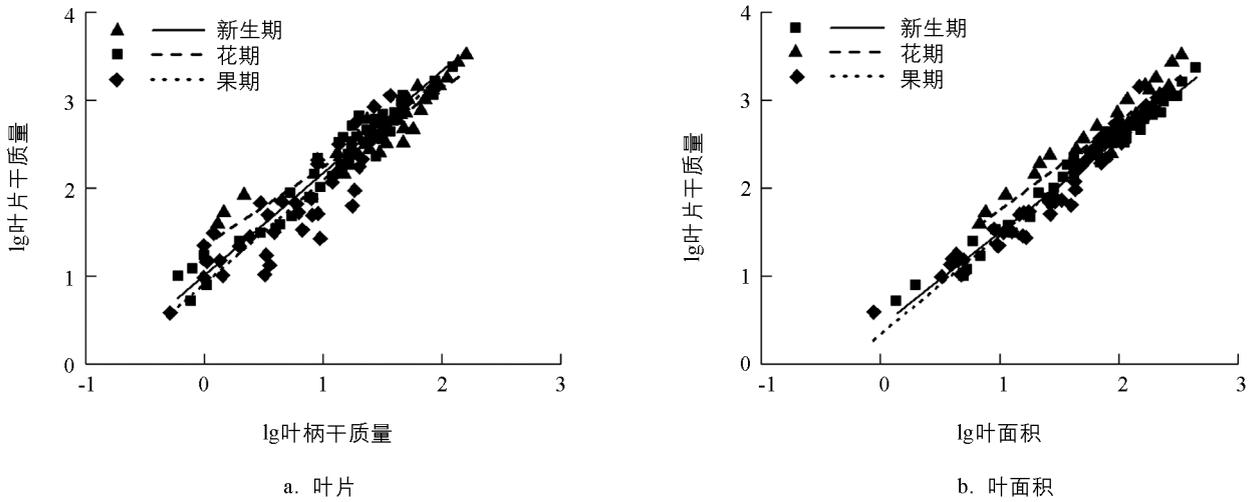


图 4 叶性状的生长关系

2.2.2 不同生活型叶性状的异速生长关系

在每一个生活型内, 叶性状间均呈极具有统计学意义的正相关关系 ($p < 0.001$, 表 2). 其 SMA 斜率在常绿植物中差异均具有统计学意义 ($p < 0.05$, 图 5), 叶片干质量与叶柄干质量 SMA 斜率在新生期显著大于 1 ($p = 0.001$), 花期与 1 无具有统计学意义的差异 ($p = 0.100$), 果期则显著小于 1 ($p = 0.020$, 图 5a); 叶片干质量与叶面积 SMA 斜率在新生期与 1 无具有统计学意义的差异 ($p = 0.625$), 在花期和果期显著大于 1 ($p < 0.05$, 图 5b). 表明随着发育历程的改变, 叶片干质量的增加速度逐渐小于叶柄干质量增加速度, 而逐渐大于叶面积增加速度.

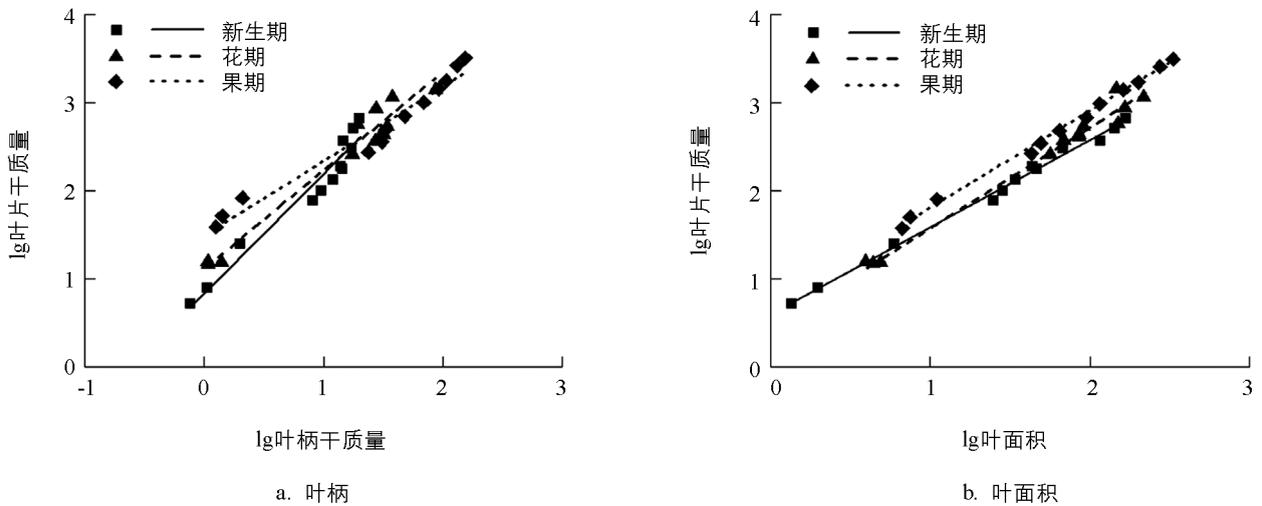


图 5 常绿植物叶性状的生长关系

在落叶植物中, 叶片干质量与叶柄干质量在不同发育阶段的共同 SMA 斜率为 1.102 (CI 为 1.024 ~ 1.186), 显著大于 1 ($p = 0.011$), 且果期的 y 轴截距显著大于花期和新生期 ($p < 0.001$), 且沿着共同主轴有显著的向上的位移 ($p = 0.007$), 表明果枝具有更大的叶片和叶柄干质量 (图 6a). 叶片干质量与叶面积 SMA 斜率在新生期显著大于 1 ($p < 0.001$), 在花期和果期与 1 无具有统计学意义的差异 ($p < 0.05$, 图 6b), 表明叶片干质量与叶面积由异速生长关系转变为等速生长关系.

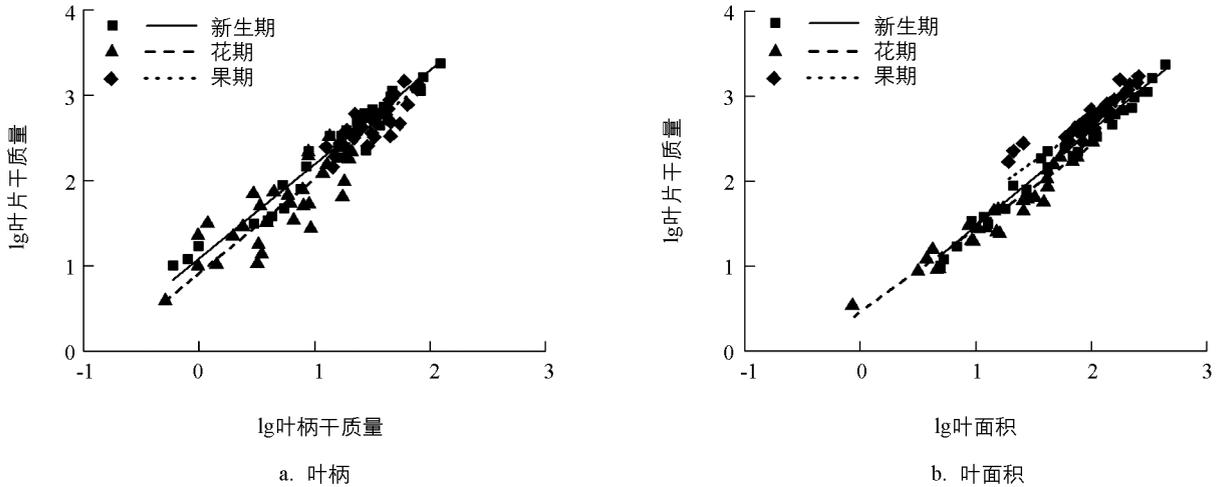


图 6 落叶植物叶性状的生长关系

3 讨论

3.1 异速生长关系随发育历程的变化

在物种水平上,花期枝叶性状相关性较差,新生期和果期则显著相关,可能是花枝中紫荆、桃等落叶植物在开花的同时叶片还未长出或正在萌发,未来需进一步研究不同开花习性间的差异.此外,不同物种之间的 SMA 斜率在不同发育阶段差异显著(图 1),即枝叶的异速生长状态在发育过程中发生了转变.这说明了随茎干质量的增加,叶柄干质量、叶片干质量和叶面积发生了真正的可塑性变化,是植物最高程度的可塑性变化^[22].新生期的茎干质量与叶柄干质量、叶片干质量及叶面积表现出小于 1 的异速生长关系,说明茎干质量的增加速度小于叶柄干质量、叶片干质量及叶面积的增加速度,花期为等速生长关系,果期为大于 1 的异速生长关系.结果表明,在枝条水平上,具有较大枝的植物比具有小枝的植物能支撑更大比例的叶面积,且具有较高的叶生物量分配比例^[23],即枝条越粗,其上生长的附属物叶也越大,这进一步证明了 Corner 法则的普适性^[24].不同发育阶段枝叶之间异速生长指数的不同反映了它们利用资源条件策略的差异.在新生期,植物通过增加叶生物量分配比例,从而增加光捕获面积,提高光合能力^[2].到了花期和果期,植物不需要通过增大叶面积以增加光合速率,且随着枝条上附属物(花、果)增多,植物所需要的养分和水分也随之增多,一般来说,茎除了具有传导水分和养分的作用外,还有支撑叶、花和果实,抵抗风的拉力等作用,这就要求茎提供额外的机械支撑,并且茎干越粗,导管越大,运输水分和养分的效率越高^[12].因此,随着发育的进行,茎干质量的增加要大于叶柄干质量、叶片干质量和叶面积的增加速度才能保证植物的生长发育.

在叶水平上,不同物种间呈显著的正相关关系,且 SMA 斜率在不同发育阶段差异显著(图 4),即随着发育阶段的变化,同化产物的分配策略发生了变化.新生期和花期的叶片干质量增加速度大于叶柄干质量和叶面积的增加速度,即植物对于叶内支撑构件(叶柄)的投资所付出的代价比其获得的收益(叶片增加)要小,这和杨冬梅、杨琼等^[10,25]的研究结果不一致.可能是因为茎和叶柄都具有传导、支撑等功能^[20],而叶柄的传导效率低于茎^[26],因此植物此时降低了对于叶柄的生物量投入.果期叶片干质量、叶柄干质量和叶面积等速生长,可能是因为果期植物对于光合面积和光合效率的要求较高,植物需要增加对于叶柄的投资,以避免叶片间相互遮挡,从而获得更多的光能,增加光合作用效率,产生更多的同化产物以满足发育的需要^[25].此外,果期风力较大,叶片和果实生物量也达到最大,植物也需要增加对于叶柄的投入以满足机械支持的作用.

3.2 常绿与落叶植物异速生长关系差异

在常绿植物中,不同发育阶段的茎叶性状间 SMA 斜率无显著差异(图 2),茎干质量增加速度与叶柄干质量、叶面积增加速度相同,小于叶片干质量的增加速度.在落叶植物中,SMA 斜率差异显著(图 3),不同发育阶段异速生长关系的变化可能说明了叶片对于代谢活性投资的变化,这个研究结果与物种间异速生长关系的变化一致.也就是说,落叶植物在不同发育阶段茎叶关系发生了真正的可塑性变化,它对于物种枝叶异速生长关系的研究可能比常绿植物更有可靠性.与花期、新生期相比,果期可能会面对更多的大风和低温胁迫,因此提高一年生枝条的支撑投资建设,且这些生物量主要以密度的形式累积在茎结构中,因此,果期茎干质量和组织密度更高^[8],这种方式在落叶植物上更加明显.与落叶植物相比,在新生期和花期,常绿植物的茎叶异速生长指数均大于落叶植物,说明当茎干质量一定的情况下,常绿植物能够支撑更多的叶干质量和叶面积;而在果期,落叶植物的茎叶异速生长指数大于常绿植物,即当叶片干质量或叶面积一定的情况下,落叶植物对于茎等支撑结构投资更高,可能是由于采样时某些落叶植物的果实结在二年生枝条上,从而使得落叶植物对于茎的投资增高.

在常绿植物中,不同发育阶段的叶性状间 SMA 斜率差异显著(图 5),且随着发育历程的改变,叶片干质量的增加速度逐渐小于叶柄干质量增加速度,而逐渐大于叶面积增加速度.在落叶植物中,叶片干质量与叶柄干质量的共同斜率大于 1,即叶片干质量的增加速度始终大于叶柄干质量的增加速度,可能是因为茎提高了足够的支持和传导水分、养分的能力,落叶植物对于叶的同化产物的分配主要集中在叶片上;叶片干质量与叶面积则由大于 1 的异速生长关系转变为等速生长关系,这一研究结果与物种间叶性状异速生长关系一致.也就是说,常绿植物叶性状间异速生长关系的可塑性变化高于落叶植物,即发生了真正可塑性变化.此外,常绿植物在新生期和花期叶片干质量与叶柄干质量 SMA 斜率大于落叶植物,而在果期表现为落叶植物大于常绿植物,说明在叶片干质量一定的情况下,常绿植物在新生期和花期支撑更低的叶柄干质量,在果期则需要支撑更多的叶柄干质量,可能是因为常绿植物叶寿命和生长季较长,水力传导性低^[4],在冬季要遭受更大的拉力,并且需要防止冻冰引起的栓塞和气穴现象,增加抗寒能力,因此单位叶柄干质量支撑较小的叶片^[20].与此同时,在新生期和花期(部分先花后叶植物),落叶植物叶片发育旺盛,因此,一定的叶柄干质量可以支持更多的叶片干质量.

4 结 论

1) 不同物种间枝、叶性状异速生长关系在发育过程中发生了转变,即随着茎、叶片干质量的增加,叶柄干质量、叶面积发生了真正的可塑性变化,是可塑性较高的性状之一.

2) 在不同发育阶段茎叶性状生长关系的比较中,随着茎干质量的变化,落叶植物的叶柄、叶片干质量和叶面积发生了真正的可塑性变化;而在叶性状生长关系的研究中,随叶片干质量的变化,常绿植物的叶柄干质量和叶面积发生了真正的可塑性变化.也就是说,植物功能性状间异速生长关系与生活型有关联.

3) 不同物种和生活型的植物在不同发育阶段(新生期、花期和果期)的茎、叶之间的异速生长关系存在差异,这说明了物种在应对发育历程的改变时,茎叶干质量的投资方式也随着资源条件的改变而改变,这种应对发育历程的改变而产生的一种适应性机制对于理解植物的生长对策,尤其是一年生枝条,具有重要的理论意义.

参考文献:

- [1] 杨冬梅. 贡嘎山植物小枝功能性状在不同生活型和不同海拔间的比较研究 [D]. 成都: 中国科学院成都生物研究所, 2009.

- [2] 姚 婧, 李 颖, 魏丽萍, 等. 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化 [J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3907-3915.
- [3] NIINEMETSÜ, PORTSMUTH A, TOBIAS M. Leaf Size Modifies Support Biomass Distribution Among Stems, Petioles and Mid-Ribs in Temperate Plants [J]. New Phytologist, 2006, 171(1): 91-104.
- [4] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The Worldwide Leaf Economics Spectrum [J]. Nature, 2004, 428 (6985): 821-827.
- [5] LIU Z W, CHEN R S, SONG Y X, et al. Distribution and Estimation of Aboveground Biomass of Alpine Shrubs along an Altitudinal Gradient in a Small Watershed of the Qilian Mountains, China [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(4): 961-971.
- [6] 丁俊祥, 范连连, 李 彦, 等. 古尔班通古特沙漠 6 种荒漠草本植物的生物量分配与相关生长关系 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1323-1330.
- [7] 张 磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 四种荒漠植物生物量分配对土壤因子的响应及异速生长分析 [J]. 广西植物, 2019, 39(9): 1201-1211.
- [8] 孙 俊, 王满堂, 程 林, 等. 不同海拔典型竹种枝叶大小异速生长关系 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 165-172.
- [9] 赵园园, 陈洪醒, 陈 红, 等. 重庆市 6 种常见园林植物功能性状对城乡生境梯度的响应 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2346-2353.
- [10] 杨冬梅, 毛林灿, 彭国全. 常绿和落叶阔叶木本植物小枝内生物量分配关系研究: 异速生长分析 [J]. 植物研究, 2011, 31(4): 472-477.
- [11] 黄文娟, 李志军, 杨赵平, 等. 胡杨异形叶结构型性状及其与胸径关系 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2347-2352.
- [12] 卢艺苗, 王满堂, 陈晓萍, 等. 江西常绿阔叶林木本植物不同冠层高度当年生小枝茎构型对叶生物量的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3653-3661.
- [13] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100-111.
- [14] 祝介东, 孟婷婷, 倪 健, 等. 不同气候带间成熟林植物叶性状间异速生长关系随功能型的变异 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 687-698.
- [15] SUN J, FAN R R, NIKLAS K J, et al. "Diminishing Returns" in the Scaling of Leaf Area Vs. Dry Mass in Wuyi Mountain Bamboos, Southeast China [J]. American Journal of Botany, 2017, 104(7): 993-998.
- [16] HUANG W W, SU X F, RATKOWSKY D A, et al. The Scaling Relationships of Leaf Biomass Vs. Leaf Surface Area of 12 Bamboo Species [J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: e00793-1-e00793-10.
- [17] 李 浪, 李义博, 马全会, 等. 水分驱动下茵陈蒿 (*Artemisia capillaris* Thunb.) 地上生物量模型与异速生长特征 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 337-348.
- [18] 杨冬梅, 章佳佳, 周 丹, 等. 木本植物茎叶功能性状及其关系随环境变化的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 702-713.
- [19] SUN J, WANG M T, LYU M, et al. Stem Diameter (and not Length) Limits Twig Leaf Biomass [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 185-1-185-10.
- [20] 潘少安, 彭国全, 杨冬梅. 从叶内生物量分配策略的角度理解叶大小的优化 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(10): 971-979.
- [21] WEINER J. Allocation, Plasticity and Allometry in Plants [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2004, 6(4): 207-215.
- [22] 陆霞梅, 周长芳, 安树青, 等. 植物的表型可塑性、异速生长及其入侵能力 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1438-1444.
- [23] SUN S C, JIN D M, SHI P L. The Leaf Size-Twig Size Spectrum of Temperate Woody Species Along an Altitudinal Gradient: an Invariant Allometric Scaling Relationship [J]. Annals of Botany, 2006, 97(1): 97-107.
- [24] CORNER E J H. The Durian Theory or the Origin of the Modern Tree [J]. Annals of Botany, 1949, 13(4): 367-414.

- [25] 杨 琼, 李征珍, 傅 强, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)叶异速生长随发育的变化 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 659-665.
- [26] TYREE M T, COCHARD H, CRUIZIAT P, et al. Drought-Induced Leaf Shedding in Walnut: Evidence for Vulnerability Segmentation [J]. Plant, Cell and Environment, 1993, 16(7): 879-882.

Development-Associated Changes in Allometric Growth Relationship of Garden Plants in Chongqing

ZHAO Yuan-yuan^{1,2}, WANG Hai-yang²

1. College of Life Sciences, Beijing Normal University/State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China;

2. School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To study the allometric growth relationship between the stem and the leaf of a plant is helpful for a better understanding of resource allocation between them. In this study, 14 kinds of common garden plants in the main urban area of Chongqing were taken as the objects to investigate the allometric growth relationship between stem and petiole, leaf dry weight and leaf area, leaf and petiole dry weight, leaf area of different species and life forms, and to quantitatively analyze their changes in different development stages. The results showed that at the species level, there were significant differences in the allometric growth relationship between stem and leaf characters at different development stages. The growth rate of stem dry weight in the new growth stage was lower than that of petiole, leaf dry weight and leaf area, and the former increased faster than the latter in the fruiting stage, while the latter increased faster in the new growth stage and the the flowering stage. At the level of life form, the slope of SMA between stem dry weight and petiole, leaf dry weight and leaf area of evergreen plants did not change with the development stage, and the results of deciduous plants were consistent with those at the species level; with the change of development process, the increasing speed of leaf dry weight of evergreen plants was gradually smaller than that of petiole dry weight, and gradually larger than that of leaf area, while the increasing speed of leaf dry weight of deciduous plants was gradually faster. It was always greater than the increase rate of dry weight of petiole, and gradually equal to the growth rate of leaf area. The above findings revealed that the resource utilization strategies of plant stem and leaf characters changed in different development stages.

Key words: allometric growth; development process; branch and leaf traits; life form