

DOI: 10.5846/stxb201910292275

马勇, 范晓慧, 刘增文, 朱凡, 林媛媛. 北方城市 12 种常见树木落花分解及其养分释放特征. 生态学报, 2021, 41(1): 48-56.

Ma Y, Fan X H, Liu Z W, Zhu F, Lin Y Y. Decomposition and nutrient release characteristics of falling flowers of 12 common tree species in northern cities. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 48-56.

北方城市 12 种常见树木落花分解及其养分释放特征

马 勇¹, 范晓慧¹, 刘增文^{1,2,*}, 朱 凡¹, 林媛媛¹

¹ 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

² 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100

摘要: 城市绿化产生的树木落花量日益增加, 由于落花富含养分, 所以研究落花的分解及其养分释放特性, 可以为落花作为施肥材料和制备生物质有机肥等农业再利用提供科学依据。以樱花 (*Cerasus sp.*)、海棠 (*Malus spectabilis*)、白玉兰 (*Magnolia denudata*)、紫玉兰 (*Magnolia liliflora*)、桃 (*Amygdalus persica*)、红叶李 (*Prunus cerasifera* I)、紫叶李 (*Prunus cerasifera* II)、含笑 (*Michelia figo*)、紫荆 (*Cercis chinensis*)、杏梅 (*Prunus mume*)、银杏 (*Ginkgo biloba*) 和栎树 (*Koelreuteria paniculate*) 等 12 种树木落花为研究对象, 通过室内落花分解模拟试验, 结果表明: (1) 粗蛋白含量以桃花和白玉兰落花中较高 (251.44—274.94 mg/g) ($P < 0.05$), 木质素含量以紫荆和银杏落花中较高 (47.35—49.95 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.5$), N 含量以桃花和白玉兰落花中较高 (40.23—43.99 mg/g) ($P < 0.5$), P 含量以桃花和白玉兰落花中较高 (1.37—1.58 mg/g) ($P < 0.5$), K 含量以红叶李、紫叶李和白玉兰落花中较高 (4.53—4.72 mg/g) ($P < 0.5$), Cu 含量以白玉兰落花中较高 (22.74 $\mu\text{g/g}$), Zn 含量以紫叶李落花中较高 (249.06 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.5$), Fe 含量以紫荆、樱花、紫叶李、杏梅、海棠和桃花中较高 (85.81—118.34 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.5$), Mn 含量以杏梅、樱花、桃花和海棠落花中较高 (24.09—25.71 $\mu\text{g/g}$) ($P < 0.5$)。 (2) 12 种落花中, 除了银杏分解稍慢 (周转期 1.12 a) 之外, 其他落花分解均较快 (周转期为 1.00—1.05 a)。 (3) 落花养分释放速率较之分解速率表现为: N 在樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑和紫荆落花中呈超速释出状态, 而在其他落花中呈慢速释出状态, P 在白玉兰、桃花、紫叶李、紫荆和银杏落花中呈超速释出状态, 而在其他落花中呈慢速释出状态, K 除了在紫荆落花中呈超速释出状态之外, 在其他落花中均呈慢速释出状态。 (4) 相关性分析表明, 落花中含有较高的粗蛋白、N、P 和 K 含量可以加快落花分解, 而落花中含有较高的木质素含量、木质素/N 和 N/P 则导致落花分解速度减慢。研究结果将为落花的资源化利用奠定理论基础。

关键词: 城市绿化; 落花利用; 枯落物分解; 养分释放

Decomposition and nutrient release characteristics of falling flowers of 12 common tree species in northern cities

MA Yong¹, FAN Xiaohui¹, LIU Zengwen^{1,2,*}, ZHU Fan¹, LIN Yuanyuan¹

¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

² Key Laboratory for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling 712100, China

Abstract: The amount of falling flowers of trees in urban greening is increasing. Because falling flowers are rich in nutrients, the study on the decomposition and nutrient release characteristics of falling flowers can provide scientific basis for the use of falling flowers as fertilizer materials and the preparation of biomass organic fertilizer and other agricultural reuse. Taking *Cerasus sp.*, *Malus spectabilis*, *Magnolia denudata*, *Magnolia liliflora*, *Amygdalus persica*, *Prunus cerasifera* I, *Prunus cerasifera* II, *Michelia figo*, *Cercis chinensis*, *Prunus mume*, *Ginkgo biloba*, and *Koelreuteria paniculate* as the research object, the falling flowers decomposition simulation experiments were carried out in laboratory. The results show

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划重点项目 (2016JZ010); 西北农林科技大学创新项目 (2018)

收稿日期: 2019-10-29; 网络出版日期: 2020-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com

that: (1) The crude protein content is higher in flowers of *Amygdalus persica* and *Magnolia denudata* (251.44—274.94 mg/g) ($P < 0.05$). The lignin content is higher in flowers of *Cercis chinensis* and *Ginkgo biloba* (47.35—49.95 $\mu\text{g/g}$) and the N content is higher in flowers of *Amygdalus persica* and *Magnolia denudata* (40.23—43.99 mg/g), but the P content is higher in flowers of *Amygdalus persica* and *Magnolia denudata* (1.37—1.58 mg/g). The K content is higher in flowers of *Prunus cerasifera* I, *Prunus cerasifera* II, and *Magnolia denudata* (4.53—4.72 mg/g), while the content of Cu is higher in flowers of *Magnolia denudata* (22.74 $\mu\text{g/g}$). The content of Zn is higher in flowers of *Prunus cerasifera* II (249.06 $\mu\text{g/g}$) and the content of Fe is higher in flowers of *Cercis chinensis*, *Cerasus sp.*, *Prunus cerasifera* II, *Prunus mume*, *Malus spectabilis* and *Amygdalus persica* (85.81—118.34 $\mu\text{g/g}$). The Mn content is higher in flowers of *Prunus mume*, *Cerasus sp.*, *Amygdalus persica* and *Malus spectabilis* (24.09—25.71 $\mu\text{g/g}$). (2) Among the 12 species of falling flowers, except that the decomposition of *Ginkgo biloba* is a little slower (the turnover period as 1.12 a), the decompositions of other falling flowers are faster (the turnover period as 1.00—1.05 a). (3) Compared with the decomposition rate, the nutrients release rate of falling flowers is as following: N in *Cerasus sp.*, *Malus spectabilis*, *Magnolia liliflora*, *Prunus cerasifera* I, *Michelia figo* and *Cercis chinensis* show overspeed release state, while in other falling flowers show slow release state. P in *Magnolia denudata*, *Amygdalus persica*, *Prunus cerasifera* II, *Cercis chinensis* and *Ginkgo biloba* falling flowers show overspeed release state, while in other falling flowers show slow release state; K, except in *Cercis chinensis* falling flowers, show slow release state. (4) The correlation analysis indicates that the higher crude protein, N, P and K contents in falling flowers can accelerate the decomposition of falling flowers, while the higher lignin content, lignin/N and N/P in falling flowers can slow down the decomposition of falling flowers. The above results will lay a theoretical foundation for the resourceful utilization of falling flowers.

Key Words: urban greening; use of falling flowers; litter decomposition; nutrient release

随着绿色发展理念的普及,城市园林绿化产生的枯落物量日益增大,除了少量直接就地归还土壤得到自然循环利用之外,其他大量枯落物被当作垃圾通过填埋或焚烧处理,这样不仅会污染地下水和大气,也会造成资源的极大浪费。因此,如何最大限度地有效利用城市绿化枯落物已成为一个新的课题。

其实,树木落花较之落叶含有更为丰富的养分物质,是直接还田作为施肥材料和制备生物质有机肥的极好资源。如新疆科研人员通过筛选出 8 种能够高效分解木质纤维素的微生物菌株,并大力研发绿化垃圾粉碎物堆制腐化的微生物发酵技术,最终研制出一种能让落花和枯枝败叶快速变为肥料的“变废为宝”的技术^[1]; 张玉山等^[2]利用落花落叶进行堆肥发酵,制成土壤改良剂并发现其对土壤具有较好的改良效果。此外,大量研究表明落花落叶不仅可用于制作生物质燃料^[3],还可以通过堆肥用作有机覆盖物^[4]、栽培基质^[5-6]等。目前关于植物枯落物分解的研究主要集中在落叶方面,而很少关注落花。大量研究表明,在环境条件一致时,枯落物分解及其养分释放主要由其初始物质组成来调控,其中木质素和 N 含量是影响枯落物分解速率的最重要因素^[7-8]。刘佳楠等^[9]对柠条锦鸡儿枯落物分解及其养分释放特征研究发现,枯落物分解率的增加趋势受分解时间和网孔大小的影响。刘增文等^[10]对枯落物分解研究方法 with 模型进行了对比评析, Singh 等^[11]对凋落物的分解及养分释放模式也做过若干报道,但由于研究年限与研究对象的不同,所得结论不能直接外推。鉴于此,本试验选择北方城市中 12 种常见绿化树种落花为研究对象,对落花的物质组成、分解速率及其养分释放特性等进行了研究,旨在为落花作为施肥材料和制备生物质有机肥等农业再利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

于 2018 年 3—5 月和 9 月在陕西省杨凌城区采集了樱花 (*Cerasus sp.*)、海棠 (*Malus spectabilis*)、白玉兰 (*Magnolia denudata*)、紫玉兰 (*Magnolia liliflora*)、桃 (*Amygdalus persica*)、红叶李 (*Prunus cerasifera* I)、紫叶李

(*Prunus cerasifera* II)、含笑(*Michelia figo*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、杏梅(*Prunus mume*)、银杏(*Ginkgo biloba*)和栾树(*Koelreuteria paniculate*)等 12 种树种当年凋落的落花,选择除去杂物和腐烂的落花,迅速漂洗后在 65℃ 下烘干并保存备用。同时在具有代表性的农田采集表层(0—10 cm)土壤,清除根系、石块等杂物,直接以鲜土过 5 mm 土壤筛后充分混合,适当风干(以便于试验过程中控制水分)备用。

1.2 落花分解试验

试验在西北农林科技大学校内实验室进行。将保存的树木落花用感量 0.01 g 的电子天平精确称取 7.00 g 后置入规格为 14 cm×20 cm,网眼孔径 0.5 mm 的尼龙网袋中并用尼龙线封口,这种网袋既能够避免分解袋中分解残体的非分解损失,也能保证分解作用不限制。分别称取 3.00 kg 的制备好的过筛土壤,装入 20 cm×40 cm×20 cm 规格的塑料培养钵中。将装有每种落花的分解袋 5 袋呈 45 度倾斜状等间距均匀埋入土壤(分解介质)内,保证落花分解袋四周与土壤充分接触。每种处理重复 5 次(即 5 个培养钵,每钵 5 袋)。

埋设完毕后,使用喷壶均匀加水调节土壤湿度至田间饱和持水量的 50%(预先测定土壤田间饱和持水量),在钵口覆保鲜膜以减缓水分散失,并留孔径 1.5 cm 通气孔 4 个以满足土壤微生物呼吸需要。分解过程中,每隔一周称量培养钵质量,根据失水情况用喷壶均匀补水,保持分解过程中土壤湿度维持一致。根据上述方法,在室温(20—25℃)恒湿下培养落花 91 d 终止。

于分解进行第 14、28、49、70 天和 91 天时进行回收,在每个处理的 5 个培养钵内分别随机回收 1 袋作为重复。将回收的落花分解残余物置于 0.15 mm 土壤筛中迅速漂洗除去表面的土壤、菌丝体等杂物,置于 65℃ 下烘干后精确称量残余物干重,每次称重后的同种落花样品混合保存,用于测定其物质组成和养分含量。

1.3 样品测定

落花中木质素含量采用酸性洗涤法测定;N 及粗蛋白含量用浓硫酸与过氧化氢进行消煮,用凯氏定氮法进行测定;使用紫外分光光度计测定 P 含量;使用火焰光度法测定 K 含量;将分解残余物经马弗炉灰化并使用 1 mol/L HCl 溶解后,使用原子吸收分光光度计测定落花中 Cu、Zn、Fe 和 Mn 元素含量。以上落花样品均 3 次重复,测定结果取其平均值。

1.4 数据处理

根据分解过程中不同时间段落花质量的变化,首先应用 Excel 2010 进行数据处理,再根据修正 Olson 衰减指数模型 $R = X/X_0 = ae^{-kt}$ 对落花分解和养分(N、P 和 K)释放动态进行拟合^[12],式中, R 为落花或落花中 N、P 和 K 残留率; X_0 、 X 分别为初始和分解 t (a) 后的落花或其中 N、P 和 K 残留量; a 为修正参数; k 为分解(养分释放)速率常数; t 为分解时间。由模型可知,当 t 取 1a 时,得落花平均年分解率或其中 N、P 和 K 年释放率 $d = 1 - ae^{-k}$ 和周转期 $T = 1/d$ 。所有数据均在 SPSS 20.0 统计分析软件中完成。对不同树种落花各指标间的差异进行单因素方差(one-way ANOVA)分析,多重比较采用最小显著差异法(LSD)($\alpha = 0.05$)。采用 Pearson 相关系数法分析落花年分解率和初始基质质量之间的相关性。采用 Sigmaplot 14.0 作图。

2 结果与分析

2.1 落花初始物质组成及养分含量特征

12 种树木落花初始养分含量(粗蛋白、木质素、N、P、K、Cu、Zn、Fe 和 Mn)存在较大差异(表 1)。不同落花粗蛋白含量介于 91.69—274.94 mg/g 之间,白玉兰和桃花粗蛋白含量(251.44—274.94 mg/g)显著高于其他落花($P < 0.05$),银杏和含笑落花粗蛋白含量(91.69—97.88 mg/g)却显著低于其他落花($P < 0.05$)。12 种落花的木质素含量介于 19.36—49.95 $\mu\text{g/g}$ 之间,其中银杏和紫荆落花木质素含量(47.35—49.95 $\mu\text{g/g}$)显著高于其他落花($P < 0.5$),而杏梅和桃花木质素含量(19.36—21.96 $\mu\text{g/g}$)显著低于其他落花($P < 0.5$)。

营养元素中,桃花和白玉兰落花 N 含量(40.23—43.99 mg/g)显著高于其他落花($P < 0.05$),而含笑和银杏落花 N 含量(14.67—15.66 mg/g)显著低于其他落花($P < 0.05$)。桃花和白玉兰落花 P 含量(1.37—1.58 mg/g)显著高于其他落花($P < 0.5$),其次为紫叶李落花(0.64 mg/g),樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑、紫

荆、杏梅、银杏和栎树等 9 种落花 P 含量(0.09—0.32 mg/g)显著低于其他落花($P<0.5$),且它们 P 含量间差异不显著($P>0.05$)。红叶李、紫叶李和白玉兰落花 K 含量(4.53—4.72 mg/g)显著高于其他落花($P<0.5$),而紫荆落花 K 含量(1.11 mg/g)显著低于其他落花($P<0.5$)。

微量元素中,白玉兰落花 Cu 含量(22.74 $\mu\text{g/g}$)显著高于其他落花($P<0.05$),紫荆、含笑、银杏、紫玉兰、栎树和红叶李落花 Cu 含量(3.03—7.91 $\mu\text{g/g}$)显著低于其他落花($P<0.05$),且它们 Cu 含量间差异不显著。Zn 含量以紫叶李落花中较高(249.06 $\mu\text{g/g}$),其次为银杏、白玉兰和海棠落花(74.34—91.21 $\mu\text{g/g}$),而樱花、含笑、杏梅、红叶李、紫玉兰、桃花、栎树和紫荆落花 Zn 含量(21.03—58.87 $\mu\text{g/g}$)显著低于其他落花($P<0.5$)。紫荆、樱花、紫叶李、杏梅、海棠和桃花 Fe 含量(85.81—118.34 $\mu\text{g/g}$)显著高于其他落花($P<0.5$),且它们 Fe 含量间差异不显著。杏梅、樱花、桃花和海棠落花 Mn 含量(24.09—25.71 $\mu\text{g/g}$)显著高于其他落花($P<0.5$),而含笑、栎树、白玉兰落花 Mn 含量(4.76—6.08 $\mu\text{g/g}$)却显著低于其他落花($P<0.5$)。

综上所述,白玉兰落花的粗蛋白、N、P、K 和 Cu 等养分含量较高,桃花的粗蛋白、N、P、Fe 和 Mn 等养分含量较高,紫叶李落花的 K、Zn 和 Fe 含量较高(表 1)。

表 1 落花初始养分含量

Table 1 Initial nutrient content of falling flowers

落花 Falling flower	粗蛋白 Crude protein/ (mg/g)	木质素 Lignin/ ($\mu\text{g/g}$)	N/ (mg/g)	P/ (mg/g)	K/ (mg/g)	Cu/ ($\mu\text{g/g}$)	Zn/ ($\mu\text{g/g}$)	Fe/ ($\mu\text{g/g}$)	Mn/ ($\mu\text{g/g}$)
樱花 <i>C. sp.</i>	168.94±18.84cd	26.35±2.14bc	27.03±3.14bc	0.24±0.04c	2.86±0.18bc	13.32±2.07b	21.03±2.24c	94.76±10.12a	24.56±2.25a
海棠 <i>M. spectabilis</i>	193.38±15.51bc	26.14±1.87bc	30.94±2.84b	0.30±0.11c	3.20±0.54bc	10.04±1.44b	91.21±10.44b	106.26±12.24a	25.71±3.42a
白玉兰 <i>M. denudata</i>	274.94±20.99a	31.78±4.77bc	43.99±4.97a	1.58±0.25a	4.72±0.47a	22.74±2.27a	84.81±7.70b	16.42±2.77b	6.08±0.74d
紫玉兰 <i>M. liliflora</i>	188.25±21.04bc	24.98±2.54bc	30.12±2.25b	0.32±0.09c	3.58±0.29b	5.38±1.12c	44.54±4.61c	37.24±3.15b	10.09±1.34c
桃 <i>A. persica</i>	251.44±22.47a	21.96±1.96c	40.23±4.16a	1.37±0.17a	3.67±0.50b	10.84±1.08b	45.09±5.06c	118.34±9.96a	24.89±3.64a
红叶李 <i>P. cerasifera</i> I	148.69±15.58de	25.54±1.85bc	23.79±1.93cd	0.27±0.05c	4.53±0.33a	3.03±0.61c	37.47±4.19c	37.38±4.37b	8.21±1.41cd
紫叶李 <i>P. cerasifera</i> II	197.00±16.09b	24.08±3.07bc	31.52±3.55b	0.64±0.04b	4.56±0.58a	13.65±1.47b	249.06±20.90a	97.90±8.92a	20.80±2.34b
含笑 <i>M. figo</i>	91.69±8.76f	34.11±3.32b	14.67±2.57e	0.11±0.04c	2.73±0.19bc	6.71±0.93c	32.65±3.77c	14.50±1.09b	4.76±0.58d
紫荆 <i>C. chinensis</i>	124.69±10.36e	47.35±5.88a	19.95±2.82de	0.13±0.06c	1.11±0.24d	7.91±1.31c	58.87±6.32c	85.81±11.97a	20.73±1.06b
杏梅 <i>P. mume</i>	135.63±15.40e	19.36±2.49c	21.70±1.73d	0.15±0.07c	2.83±0.29bc	12.06±2.90b	34.16±4.99c	105.28±9.78a	24.09±2.16a
银杏 <i>G. biloba</i>	97.88±7.72f	49.95±4.12a	15.66±1.66e	0.09±0.01c	2.45±0.34c	6.47±0.47c	74.34±7.65b	46.21±3.58b	10.08±0.83c
栎树 <i>K. paniculate</i>	184.25±20.56bc	30.83±4.15bc	29.48±3.30b	0.24±0.05c	2.92±0.30bc	5.19±0.73c	56.94±6.11c	21.45±3.11b	5.14±0.79d

表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示不同落花间显著差异 ($P<0.05$)

2.2 落花分解速率及其分解动态

依据每次的残留率数据,采用修正 Olson 衰减指数模型拟合 12 种落花的分解速率曲线,得到分解常数 k 并估算出各落花的平均年分解率 d 和周转期 T 。根据分解试验结果(表 2),在完全相同的环境条件下,除了银杏落花分解稍慢(周转期 1.12 a)其他落花分解均较快(周转期 1.00—1.05 a)。

落花干重残留率是指落花分解 t(a) 后的落花干质量与分解前落花干质量的比值,它不仅能够反映分解过程中落花质量的动态变化,还可以表征落花的分解速率。12 种树木落花的干重残留率在 0—91 d 的分解过程中逐渐减少(图 1)。可以看出,整个实验周期根据残余率,可明显的分为两个时期,即分解前期(0—14 d)和中后期(15—91 d)。至分解前期结束,樱花(分解率达 49.57%)、海棠(分解率达 39.71%)、白玉兰(分解率达 59.46%)、紫玉兰(分解率达 57.06%)、桃花(分解率达 49.00%)、红叶李(分解率达 52.09%)、紫叶李(分解率达 49.00%)、含笑(分解率达 37.57%)、紫荆(分解率达 46.86%)、杏梅(分解率达 42.74%)、银杏(分解率达 36.54%)和栎树(分解率达 44.71%)等 12 种落花均分解了基质质量的 1/3 以上;分解中后期以上 12 种落花的分解速率逐渐减慢。至分解结束,各落花的分解率均不少于 47.80%(银杏落花),最大分解率达到了 76.46%(白玉兰落花)。

表 2 不同落花的分解速率

Table 2 Decomposition rate of different falling flowers

落花 Falling flower	分解模型 $\ln R = \ln a - kt$ Decay model	年分解率 $d = 1 - e^{-k}$ Annual decay rate	周转期 $T = 1/d/a$ Turnover period
樱花 <i>C. sp.</i>	$\ln R = -3.3031t - 0.3422$	0.9739	1.0268c
海棠 <i>M. spectabilis</i>	$\ln R = -3.5706t - 0.2062$	0.9771	1.0234c
白玉兰 <i>M. denudata</i>	$\ln R = -4.7186t - 0.5204$	0.9947	1.0053c
紫玉兰 <i>M. liliflora</i>	$\ln R = -3.8117t - 0.4270$	0.9856	1.0146c
桃 <i>A. persica</i>	$\ln R = -4.7262t - 0.2961$	0.9934	1.0066c
红叶李 <i>P. cerasifera</i> I	$\ln R = -3.3752t - 0.3802$	0.9766	1.0240c
紫叶李 <i>P. cerasifera</i> II	$\ln R = -4.4436t - 0.2365$	0.9907	1.0094c
含笑 <i>M. figo</i>	$\ln R = -2.7611t - 0.2579$	0.9511	1.0514b
紫荆 <i>C. chinensis</i>	$\ln R = -2.8015t - 0.3122$	0.9556	1.0465b
杏梅 <i>P. mume</i>	$\ln R = -2.9213t - 0.2397$	0.9576	1.0443b
银杏 <i>G. biloba</i>	$\ln R = -2.0057t - 0.2332$	0.8934	1.1193a
栎树 <i>K. paniculate</i>	$\ln R = -3.3117t - 0.3361$	0.9740	1.0267c

R:落花残留率, residue ratio of falling flower; a:修正参数, correction parameter; k:分解速率常数, decomposition rate constant; t:分解时间, time of decay

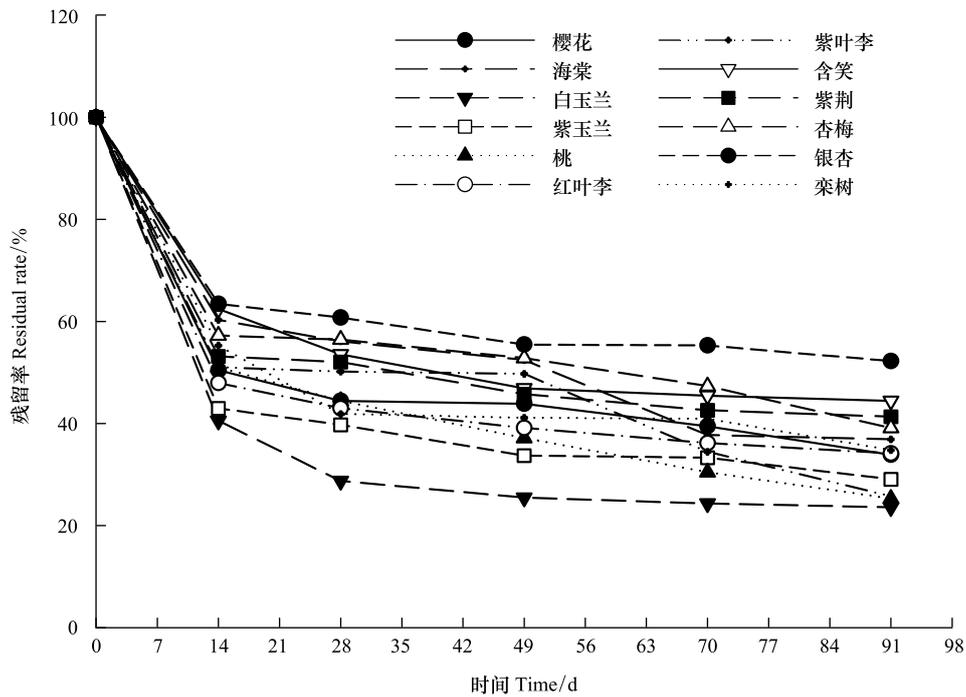


图 1 落花分解干质量残留率的动态变化

Fig.1 Dynamic change of mass residual rate in falling flower decomposition

2.3 落花分解过程中 N、P 和 K 的释放

从各种落花分解过程的 N 释放规律(表 3)可以看出,释放较快的有紫玉兰、紫叶李、白玉兰、桃花、紫荆、红叶李、樱花、含笑和海棠(周转期 1.00—1.04 a),而杏梅、栎树和银杏 N 释放显著慢于其他落花(周转期 1.22—1.33 a)($P < 0.05$)。

由表 2 和表 3 可知,12 种落花 N 的释放速率较之分解速率各有差异,其中樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑和紫荆落花 N 的释放速率大于其分解速率,而白玉兰、桃花、紫叶李、杏梅、银杏和栎树落花 N 的释放速率

小于其分解速率,表明 N 在樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑和紫荆落花中呈超速释出状态(超过落花质量下降的速率),而在白玉兰、桃花、紫叶李、杏梅、银杏和栎树落花中呈慢速释出状态。

表 3 不同落花的 N 释放率

Table 3 N release rate of different falling flowers

落花 Falling flower	释放模型 $\ln R = \ln a - kt$ Release model	年释放率 $d = 1 - e^{-k}$ Annual release rate	周转期 $T = 1/d / a$ Turnover period
樱花 <i>C. sp.</i>	$\ln R = -7.6306t + 0.5248$	0.9992	1.0008b
海棠 <i>M. spectabilis</i>	$\ln R = -9.9981t + 0.2202$	0.9999	1.0001b
白玉兰 <i>M. denudata</i>	$\ln R = -4.4800t + 0.0927$	0.9876	1.0126b
紫玉兰 <i>M. liliflora</i>	$\ln R = -3.4465t + 0.2815$	0.9578	1.0441b
桃 <i>A. persica</i>	$\ln R = -4.5278t + 0.0255$	0.9889	1.0112b
红叶李 <i>P. cerasifera</i> I	$\ln R = -6.6629t + 0.0700$	0.9986	1.0014b
紫叶李 <i>P. cerasifera</i> II	$\ln R = -4.3626t + 0.2128$	0.9842	1.0160b
含笑 <i>M. figo</i>	$\ln R = -10.1800t + 0.3865$	0.9999	1.0001b
紫荆 <i>C. chinensis</i>	$\ln R = -5.7717t + 0.3138$	0.9957	1.0043b
杏梅 <i>P. mume</i>	$\ln R = -2.0291t + 0.2999$	0.8226	1.2157a
银杏 <i>G. biloba</i>	$\ln R = -1.9078t + 0.5075$	0.7535	1.3272a
栎树 <i>K. paniculate</i>	$\ln R = -1.9176t + 0.3278$	0.7880	1.2690a

R: 养分残留率, nutrient residual rate; a: 修正参数, correction parameter; k: 养分释放速率常数, nutrient release rate constant; t: 分解时间, time of decay

从各种落花分解过程的 P 释放规律(表 4)可以看出,释放较快的有栎树、海棠、樱花、紫玉兰、银杏、紫荆、紫叶李、白玉兰和桃花(周转期 1.00—1.09 a),其次为红叶李落花(周转期 1.37 a),释放较慢的是杏梅和含笑(周转期 1.54—1.56 a)。

结合表 2 和表 4 还可看出,白玉兰、桃花、紫叶李、紫荆和银杏落花 P 释放速率大于其分解速率,而樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑、杏梅和栎树落花 P 释放速率小于其分解速率,可见 P 在白玉兰、桃花、紫叶李、紫荆和银杏落花中呈超速释出状态,而在樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑、杏梅和栎树落花中呈慢速释出状态。

表 4 不同落花的 P 释放率

Table 4 P release rate of different falling flowers

落花 Falling flower	释放模型 $\ln R = \ln a - kt$ Release model	年释放率 $d = 1 - e^{-k}$ Annual release rate	周转期 $T = 1/d / a$ Turnover period
樱花 <i>C. sp.</i>	$\ln R = -3.8296t + 0.2262$	0.9728	1.0280c
海棠 <i>M. spectabilis</i>	$\ln R = -2.5308t - 0.0017$	0.9205	1.0863c
白玉兰 <i>M. denudata</i>	$\ln R = -7.6554t - 0.0572$	0.9996	1.0004c
紫玉兰 <i>M. liliflora</i>	$\ln R = -4.1068t + 0.3293$	0.9771	1.0234c
桃 <i>A. persica</i>	$\ln R = -11.038t + 0.0825$	0.9999	1.0000c
红叶李 <i>P. cerasifera</i> I	$\ln R = -1.3874t + 0.0888$	0.7271	1.3754b
紫叶李 <i>P. cerasifera</i> II	$\ln R = -7.1679t - 0.0285$	0.9993	1.0007c
含笑 <i>M. figo</i>	$\ln R = -1.4409t + 0.3893$	0.6506	1.5370a
紫荆 <i>C. chinensis</i>	$\ln R = -4.2847t + 0.4513$	0.9784	1.0221c
杏梅 <i>P. mume</i>	$\ln R = -1.2510t + 0.2220$	0.6426	1.5561a
银杏 <i>G. biloba</i>	$\ln R = -4.3048t + 0.5265$	0.9771	1.0234c
栎树 <i>K. paniculate</i>	$\ln R = -2.4305t - 0.0722$	0.9181	1.0892c

根据各种落花分解过程的 K 释放规律(表 5)可知,紫玉兰、紫叶李、红叶李、白玉兰和紫荆 K 释放速度显著快于其他落花(周转期 1.02—1.10 a) ($P < 0.05$),银杏和杏梅 K 释放速度显著慢于其他落花(周转期 1.72—1.96 a) ($P < 0.05$)。

结合表 2 和表 5 可知,除了紫荆落花 K 的释放速率大于其分解速率,其他落花 K 释放速率均小于其分解速率,表明 K 在紫荆落花中呈超速释出状态,而在其他落花中呈慢速释出状态。

表 5 不同落花的 K 释放率

Table 5 K release rate of different falling flowers

落花 Falling flower	释放模型 $\ln R = \ln a - kt$ Release model	年释放率 $d = 1 - e^{-k}$ Annual release rate	周转期 $T = 1/d / a$ Turnover period
樱花 <i>C. sp.</i>	$\ln R = -1.2157t - 0.0214$	0.7098	1.4089b
海棠 <i>M. spectabilis</i>	$\ln R = -1.5214t - 0.0240$	0.7868	1.2710b
白玉兰 <i>M. denudata</i>	$\ln R = -3.3987t - 0.0735$	0.9690	1.0320c
紫玉兰 <i>M. liliflora</i>	$\ln R = -2.4185t + 0.0338$	0.9079	1.1015c
桃 <i>A. persica</i>	$\ln R = -1.4567t - 0.1684$	0.8031	1.2452b
红叶李 <i>P. cerasifera</i> I	$\ln R = -2.7878t - 0.1049$	0.9446	1.0587c
紫叶李 <i>P. cerasifera</i> II	$\ln R = -2.1808t - 0.3069$	0.9169	1.0906c
含笑 <i>M. figo</i>	$\ln R = -1.1520t + 0.0006$	0.6838	1.4624b
紫荆 <i>C. chinensis</i>	$\ln R = -3.7158t - 0.0212$	0.9762	1.0244c
杏梅 <i>P. mume</i>	$\ln R = -0.8500t - 0.0170$	0.5798	1.7248a
银杏 <i>G. biloba</i>	$\ln R = -0.7187t + 0.0067$	0.5093	1.9633a
栾树 <i>K. paniculate</i>	$\ln R = -1.4285t + 0.0078$	0.7585	1.3185b

2.4 落花年分解率与初始化学组成之间的关系

对落花年分解率 (d) 与落花初始化学组成进行相关性分析 (表 6), 结果表明, 落花的年分解率与初始粗蛋白、N、P 和 K 含量均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与木质素含量、木质素/N 和 N/P 均呈显著负相关 ($P < 0.01$), 与 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量之间则无显著相关性 ($P > 0.05$)。

表 6 落花年分解率 (d) 与初始化学性质相关性Table 6 Correlation between annual decomposition rate (d) and initial chemical properties of falling flowers

指标 Index	粗蛋白 Crude protein	木质素 Lignin	N	P	K	Cu	Zn	Fe	Mn	木质素/N Lignin/N	N/P
相关系数 Correlation coefficient	0.789 **	-0.729 **	0.789 **	0.586 *	0.600 *	0.380	0.202	0.161	0.179	-0.901 **	-0.827 **

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$

3 讨论

3.1 落花初始化学成分对其分解速率的影响

在相同的环境条件下, 枯落物的基质质量是影响其相对分解速率的主要因子^[13-14]。N 含量、P 含量、木质素含量和木质素/N 值等被用作枯落物基质质量的常见指标。其中 C/N 和木质素/N 最能反映枯落物分解速率^[15]。研究发现, 枯落物的初始 N 含量高会加快其分解^[16], 这是因为微生物对 N 有很高需求, 枯落物 N 含量低时会限制微生物群落活动强度, 导致其分解变慢, 而 N 含量高时会提高微生物群落活动强度进而加快其分解^[17-18]。本研究中, 桃花的分解速率相对较快 (表 2), 这可能与其初始 N 含量显著高于其他落花 ($P < 0.05$) 有关 (见表 1)。此外, 银杏落花分解较慢 ($P < 0.05$) 可能与其含有较低 ($P < 0.05$) 初始 N 含量有关。根据表 6 可知, 落花年分解率与初始 N 含量显著正相关 ($P < 0.01$), 这与窦荣鹏^[19] 和刘霞^[20] 的研究结果一致, 可能是由于枯落物中的 N 含量越高, 则 C/N 越低, 耐分解化合物的含量越少, 枯落物分解越快^[21]。

枯落物分解过程中, N 是制约凋落物分解的最重要因素之一, 但由于 N 沉降的增加, 许多生态系统 N 已

不再是制约因素,而 P 则成为重要的限制因素^[22]。本研究结果表明,初始 P 含量较高($P < 0.05$)的白玉兰和桃花其年分解率也相对较快,落花年分解率与初始 P 含量显著正相关($P < 0.05$) (表 6),原因与 N 类似,同为微生物不可缺少的营养元素,P 含量高会加强微生物的活动强度,进而加快落花分解,但这与刘霞^[20]的研究结果相反,可能由于树种不同或环境因子不同所导致。P 含量并非单独影响枯落物分解速率,N/P 对枯落物的分解也具有一定的表征能力,它是枯落物分解者养分限制的重要指标^[23]。本研究发现落花初始 N/P 越大落花分解就越慢,二者呈显著负相关($P < 0.01$),张林海^[24]的研究也呈现出这样的规律。有研究表明^[25],N/P < 10 时,分解受到 N 的限制;N/P > 14 时,分解受到枯落物中 P 的限制,因此 N/P 是枯落物短期分解的一个重要因素。

根据表 6 可知,落花年分解率与 K 含量显著正相关($P < 0.05$),这与李学斌^[26]对荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物进行研究所得结果相一致,但与宋新章^[27]在浙江千岛湖姥山林场对 7 种常绿阔叶林的枯落物研究所得结果存在一定差异,这可能与物种不同、枯落物性质不同有关。总体而言,目前国内外关于 K 含量(浓度)对枯落物分解速率的影响的相关研究还有待丰富,因此我们应针对这方面深入探索。

木质素含量也是衡量枯落物分解速率的重要指标。多数研究认为^[28-29],枯落物的初始木质素含量及木质素/N 与枯落物分解速率呈显著负相关。本文研究结果(表 6)也符合上述规律,因为质素含量或木质素/N 越高越有利于抵抗分解者对枯落物的攻击,从而减缓了枯落物的分解^[30]。因而在农业生产中,应尽量选择木质素含量和木质素/N 较低且养分含量较高的物质用作施肥材料,如桃花、白玉兰落花等。

3.2 分解时期对其分解速率的影响

通常,枯落物的分解分为两个阶段:即主要分解新鲜有机质、可溶性糖和无机盐类物质的快速分解阶段和分解木质素等难分解成分的慢速分解阶段^[29]。研究发现,分解前期由 N 含量制约枯落物分解速率,N 含量高的枯落物分解快于 N 含量低的枯落物;而分解后期则由木质素含量或木质素/N 比制约分解速率,此时 N 含量会延缓枯落物的分解速率^[31]。由图 1 可知,分解前期(0—14 d)落花分解较快,中后期(15—91 d)分解则逐渐变慢,这与郭忠玲等^[32]的研究结果保持一致。原因可能是前期落花中 N、P 等易分解物质含量较高,微生物快速繁殖,使落花分解速率也随之增加,分解率提高;到分解中后期,水溶性物质及碳水化合物等易分解的物质已经分解掉,纤维素、木质素等难分解物质比例增加,因而使得分解变慢^[13,33]。

4 结论

(1) 12 种落花初始养分含量存在差异。其中,粗蛋白含量以桃花和白玉兰落花中较高(251.44—274.94 mg/g),木质素含量以紫荆和银杏落花中较高(47.35—49.95 $\mu\text{g/g}$),N 含量以桃花和白玉兰落花中较高(40.23—43.99 mg/g),P 含量以桃花和白玉兰落花中较高(1.37—1.58 mg/g),K 含量以红叶李、紫叶李和白玉兰落花中较高(4.53—4.72 mg/g),Cu 含量以白玉兰落花中较高(22.74 $\mu\text{g/g}$),Zn 含量以紫叶李落花中较高(249.06 $\mu\text{g/g}$),Fe 含量以紫荆、樱花、紫叶李、杏梅、海棠和桃花中较高(85.81—118.34 $\mu\text{g/g}$),Mn 含量以杏梅、樱花、桃花和海棠落花中较高(24.09—25.71 $\mu\text{g/g}$)。

(2) 对 12 种落花的分解速率进行修正 Olson 模型拟合,结果表明,除了银杏分解稍慢(周转期 1.12 a),其他落花分解均较快(周转期 1.00—1.05 a)。

(3) 分解过程中 N、P 和 K 释放均较快的落花有紫玉兰、紫叶李、白玉兰、紫叶李、红叶李和紫荆,且较之其分解速率,只有樱花、海棠、紫玉兰、红叶李、含笑和紫荆落花中的 N 呈超速释出状态,白玉兰、桃花、紫叶李、紫荆和银杏落花中的 P 呈超速释出状态,紫荆落花中 K 呈超速释出状态。

(4) 相关性分析表明,落花的年分解率与粗蛋白含量、N 含量、P 含量和 K 含量均呈显著正相关($P < 0.05$),与木质素含量、木质素/N 和 N/P 均呈极显著负相关($P < 0.01$),与 Cu 含量、Zn 含量、Fe 含量和 Mn 含量之间则无显著相关性($P > 0.05$)。表明落花中含有较高的粗蛋白、N、P 和 K 含量有利于落花分解,而落花中含有较高的木质素含量、木质素/N 和 N/P 则对落花分解不利。

参考文献 (References):

- [1] 朱彤, 李杨. 绿化垃圾变肥料成现实. 化工管理, 2013(11): 57-57.
- [2] 张玉山, 梁伟杰, 杨森, 陈文杰, 陈海莲, 梁怀宇, 李树胜, 刘文利, 沈志华. 绿化废弃物资源化利用促进绿色农业循环发展. 广西植物, 2018, 38(8): 1070-1080.
- [3] 石帅. 北京市以园林绿化废弃物为原料的生物质燃料市场推广研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [4] 杨艳. 有机覆盖物在“节约型园林”中的应用. 四川建筑, 2017, 37(1): 11-13.
- [5] 王浩, 原一荃, 王亚琪, 周根娣, 王繁. 园林绿化废弃物堆肥用作青菜育苗基质的效果研究. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2015, 14(2): 196-201.
- [6] 卢赞. 分析园林绿化废弃物堆肥用作花卉栽培基质的效果. 农业与技术, 2017, 37(12): 215-215.
- [7] 金龙, 吴志祥, 杨川, 管利民, 赖华英. 不同林龄橡胶凋落物叶分解特性与有机碳动态研究. 热带作物学报, 2015, 36(4): 698-705.
- [8] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 胡庭兴, 涂利华, 黄从德, 高保丹. 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响. 生态学报, 2017, 37(2): 455-463.
- [9] 刘佳楠, 赵娟, 常海涛, 张安宁, 陈蔚, 刘任涛. 基于网孔分解袋法的荒漠草原柠条枯落物分解过程中的养分变化. 草业科学, 2019, 36(6): 1624-1633.
- [10] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 杜红霞, 张丽萍. 枯落物分解研究方法和模型讨论. 生态学报, 2006, 26(6): 1993-2000.
- [11] Singh K P, Singh P K, Tripathi S K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(4): 371-378.
- [12] 杨艳鲜, 冯光恒, 潘志贤, 沙毓沧, 刘祖涵, 纪中华. 干热河谷罗望子人工林凋落物分解及养分释放. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 102-107.
- [13] 敬如岩, 黄雅丽, 丁新景, 陈博杰, 马风云. 黄河三角洲地区刺槐白蜡人工混交林枯落物分解的林龄差异. 水土保持学报, 2017, 31(6): 333-337.
- [14] 李晓, 孙志高, 何涛, 高会, 王华, 王杰. 基于分解袋法的闽江河口芦苇和短叶荳蔻枯落物的残留率和分解速率. 湿地科学, 2019, 17(1): 94-99.
- [15] Hobbie S E. Temperature and Plant Species Control Over Litter Decomposition in Alaskan Tundra. *Ecological Monographs*, 1996, 66(4): 503-522.
- [16] Alhamd L, Arakaki S, Hagihara A. Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1-3): 1-11.
- [17] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 王少昆. 陆地生态系统凋落物分解研究进展. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [18] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77-83.
- [19] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 马元丹, 郭培培. 柳杉凋落物在中国亚热带和热带的分解. 生态学报, 2010, 30(7): 1758-1763.
- [20] 刘霞, 周涛, 吴昊, 徐培培, 罗惠, 曹乐瑶. 中国森林凋落物分解速率的空间格局及主控因子——基于最优线性混合模型. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(4): 553-560.
- [21] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(3): 391-399.
- [22] 李秀云, 李润祥. 影响森林凋落物分解的因素. 农民致富之友, 2012(20): 89-89.
- [23] 张新厚, 宫超. 湿地挺水植物凋落物立枯分解研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(4): 712-717.
- [24] 张林海, 曾从盛, 张文娟, 王天鹅, 仝川. 闽江河口湿地枯落物分解及主要影响因子. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2404-2410.
- [25] 秦胜金, 刘景双, 周旺明, 程莉. 三江平原小叶章湿地枯落物初期分解动态. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1217-1222.
- [26] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 宋乃平, 李昕. 荒漠草原4种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素. 生态学报, 2015, 35(12): 4105-4114.
- [27] 宋新章, 江洪, 余树全, 马元丹, 周国模, 窦荣鹏, 郭培培. 中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解试验. 应用生态学报, 2009, 20(3): 537-542.
- [28] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 王海鹏, 王滨, 张艳, 彭艳君, 陈青松, 徐振锋. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子. 植物生态学报, 2014, 38(6): 529-539.
- [29] 刘晶, 谢婉余, 张巧明, 徐少君. 黄土丘陵区不同植物凋落叶片的分解及养分释放特性. 草业学报, 2018, 27(9): 25-33.
- [30] Tian G, Kang B T, Brussaard L. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions—Decomposition and nutrient release. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(10): 1051-1060.
- [31] 王卫霞, 史作民, 罗达, 刘世荣. 南亚热带格木和红椎凋落叶及细根分解特征. 生态学报, 2016, 36(12): 3479-3487.
- [32] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 李庆康, 于贵瑞, 韩士杰, 范春楠, 刘万德. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究. 生态学报, 2006, 26(4): 1037-1046.
- [33] 曹富强, 刘朝晖, 刘敏, 崔俊峰. 森林凋落物及其分解过程的研究进展. 广西农业科学, 2010, 41(7): 693-697.