第 40 卷 第 2 期
2020 年 2 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 40 No. 2
Feb. 2020
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.02.014
http: //qks.csuft.edu.cn

亚热带不同植被恢复林地凋落物层碳、氮、磷化学计量特征

杜雨潭[1]，陈金磊[1]，李雷达[1]，辜　翔[1]，刘兆丹[1]，苏元博[1]，方　晰[1, 2]

（1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院，湖南 长沙 410004；
2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室，湖南 长沙 410004）

摘　要：【目的】探究不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量及其碳（C）、氮（N）、磷（P）化学计量的差异，为亚热带地区退化林地的植被恢复和管理提供科学依据。【方法】采用空间代替时间的方法，在位于亚热带丘陵区的湖南省长沙县选取地域相邻、环境条件基本一致的 4 种处于不同植被恢复阶段林地：檵木 - 南烛 - 杜鹃灌草丛（LVR）、檵木 - 杉木 - 白栎灌木林（LCQ）、马尾松 - 柯（又名石栎）- 檵木针阔混交林（PLL）、柯 - 红淡比 - 青冈常绿阔叶林（LAG）作为一个恢复序列，设置固定样地，按未分解层、半分解层和已分解层采集凋落物层分析样品，测定凋落物层现存量以及不同分解层凋落物 C、N、P 含量及其化学计量比。【结果】1）凋落物层及其各分解层凋落物的现存量总体上随着植被恢复而增加，同一林地不同分解层表现为：已分解层＞半分解层＞未分解层，不同分解层之间的差异随着植被恢复而增大。2）凋落物层 C 含量以 PLL 最高，LCQ 最低，而 N、P 含量总体上随着植被恢复而增高；C、N、P 含量随着凋落物的分解而下降。3）无论是整个凋落物层 C 储量还是各分解层凋落物 C 储量，均以 PLL 最高，其次是 LAG，LVR 最低，而 N、P 储量随着植被恢复而增高。4）整个凋落物层以及各分解层凋落物的 C/N 比值均表现为：PLL ＞ LVR ＞ LCQ ＞ LAG，而 C/P、N/P 比值总体上随着植被恢复呈下降趋势；C/N、C/P、N/P 比值基本上随着凋落物的分解而下降。【结论】随着植被恢复，凋落物层现存量及其 N、P 含量增加，C/N、C/P、N/P 比值下降，体现了生态系统物质循环随着植被恢复逐渐优化。

关键词：湘中丘陵区；植被恢复；地表凋落物；分解层；C、N、P 含量；化学计量比

中图分类号：S714.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2020)02-0108-12

C, N and P stoichiometry characteristics of forest floor litter layer at different vegetation restoration stages in the mid-subtropical regions, China

DU Yutan[1], CHEN Jinlei[1], LI Leida[1], GU Xiang[1], LIU Zhaodan[1], SU Yuanbo[1], FANG Xi[1,2]

(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】In order to explore the difference of litter layer existing amount and its carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) stoichiometry in different vegetation restoration stages, so as to provide scientific basis for vegetation restoration and management of degraded forest land in subtropical region.【Method】By using the space-for-time substitution method, we selected four different types of plant communities, comprising of *Loropetalum chinense*+*Vaccinium bracteatum*+*Rhododendron simsii* scrub-grass-land (LVR), *Loropetalum chinense*+*Cunninghamia lanceolata*+*Quercus fabri* shrubbery (LCQ), *Pinus massoniana*+*Lithocarpus glaber*+*Loropetalum chinense* coniferous-broad leaved mixed forest (PLL), and *Lithocarpus glaber*+*Cleyera japonica*+*Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest (LAG) to represent the vegetation restoration sequence in the secondary forests in the hilly area of central Hunan province, China. Based on decomposition state, the litter on the forest floor was divided into un-decomposed layer, semi-decomposed layer, and decomposed layer. Litter samples were taken from these three layers separately in fixed plots in the four forests. Concentrations of C, N and P in litter sample were analyzed and the ratios of C/N, C/P and N/P were estimated, and the dynamics of C, N, P in litter layer with vegetation restoration were discussed.【Result】1) On the whole, the stocks of litter layers and its different decomposed layers increased with vegetation restoration. The stocks of different decomposed layers in the same forest were in the

收稿日期：2019-01-21
基金项目：国家林业公益性行业科研专项（201504411）。
第一作者：杜雨潭，硕士研究生。　　**通信作者：**方晰，教授，博士，博士生导师。E-mail：fangxizhang@sina.com
引文格式：杜雨潭 , 陈金磊 , 李雷达 , 等 . 亚热带不同植被恢复林地凋落物层碳、氮、磷化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2020, 40(2):108-119.
DU Y T, CHEN J L, LI L D, *et al*. C, N and P stoichiometry characteristics of forest floor litter layer at different vegetation restoration stages in the mid-subtropical regions, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2):108-119.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

order as follows: decomposed layer > semi-decomposed layer > un-decomposed layer, and the differences of different decomposed layers were increased with vegetation restoration. 2) Concentrations of C in the litter layer was the highest in PLL and the lowest in LCQ, while concentrations of N and P increased with the restoration of vegetation. Concentrations of C, N and P decreased with the decomposition of litter. 3) Both the C storage in litter layers and in different decomposed layers were the higest in PLL, followed by in LAG and the lowest in LVR, while the storage of N and P increased with vegetation restoration. 4) The C/N ratios in litter layers and in the different decomposed layers were in the order as follows: PLL > LVR > LCQ > LAG, while the C/P and N/P ratios decreased with the vegetation restoration in general. The ratios of C/N, C/P, N/P basically decreased with the decomposition of litter.【Conclusion】Stock of litter layer, concentrations of N and P increased, while the ratios of C/N, C/P, N/P decreased with vegetation restoration, which demonstrated that material cycling in ecosystems was optimized with vegetation restoration.

Keywords: hilly area in central Hunan province; vegetation restoration; forest floor litter; decomposed layer; C, N, P concentration; stoichiometric ratio

凋落物（也称枯落物）的分解过程是森林生态系统养分循环、能量流动的基本过程[1]，是地上植被与土壤之间物质交换的“枢纽”，也是森林土壤肥力的自然来源之一[2]，对森林生态系统的有机质储存和养分循环起着重要的作用[3]。因此，森林凋落物及其在地表形成的凋落物层是生态学、土壤学、生物地球化学的重要研究内容之一。凋落物层是地上植物生长发育过程中产生并归还到地表形成的死有机物质，由未分解、半分解及已分解的凋落物组成，是森林生态系统的重要组成部分，其种类、贮量和数量上的消长反映着群落间的差别和动态特征[4]。

1876年，德国学者E. Ebermayer阐述了森林凋落物在养分循环中的重要性。随后，许多学者对森林凋落物进行了大量的研究[5-6]。20世纪60年代初，国内开始开展凋落物的研究，20世纪80年代有较大进展，凋落物的积累和分解被认为是控制生态系统能量流动与功能结构的重要因素，研究主要集中在凋落物的年凋落量、组成及其动态变化[7]，凋落物的分解速率及其养分释放规律[8-9]等方面。然而，有关林地地表凋落物层的研究，特别是凋落物层现存量大多是因为其是生态系统生物量的组成部分，才会在研究生态系统生物量时被提及，而且大多研究却忽视了不同植物群落由于组成树种的差异，凋落物产量及其形成的凋落物层现存量可能会有较大的差异[10-11]。近年来，随着人们对森林生态系统凋落物研究的深入，也逐渐关注凋落物层现存量及其与其他生态因子（如土壤[12]、气象因子[13]、动物[14]等）的关系，但也主要集中在亚热带的针叶林，而有关阔叶林、针阔混交林的研究报道仍较少[15]。此外，近年来的C、N、P化学计量特征研究也主要集中在植物的鲜叶[16-17]，不同演替阶段植物群落土壤[18-20]两方面，有关地表凋落物层C、N、P化学计量特征的研究报道仍很少[21-22]。

中国亚热带地区分布着大面积的常绿阔叶林，是全球同纬度地带上的“绿洲”。但由于长期受到人类干扰，常绿阔叶林遭到了严重破坏，生物多样性下降，生态系统功能衰退。为了保护生物多样性和恢复常绿阔叶林的生态服务功能，近20多年来，中国政府实施了天然林保护、退耕还林和防护林体系等建设一系列林业生态工程，该地区植被恢复迅速，但由于人为干扰强度不同，形成了处于不同恢复阶段的多种次生植物群落。在亚热带特定的气候条件和土壤类型下，森林皆伐后，从次生裸地开始，植被恢复的通常模式是：经2～3 a的自然恢复，形成以草本植物为主，伴随少量灌木的灌草丛；约再经10 a恢复为以檵木 *Loropetalum chinense*、南烛 *Vaccinium bracteatum*、杜鹃 *Rhododendron mariesii*、白栎 *Quercus fabri*、茅栗 *Castanea seguinii* 等灌木为主的灌木林；随后约30年出现一些阳性先锋乔木树种，如马尾松 *Pinus massoniana* 针叶树种和枫香 *Liquidambar formosana*、麻栎 *Quercus acutissima*、南酸枣 *Choerospondias axillaries*、拟赤杨 *Alniphyllum fortunei* 等落叶阔叶树种，形成马尾松针叶林，马尾松针阔混交林或落叶常绿阔叶林；随后恢复演替为以壳斗科Fagaceae（如柯 *Lithocarpus glaber*、青冈 *Cyclobalanopsis glauca*）、山茶科Theaceae（如木荷 *Schima superba*、红淡比 *Cleyera japonica*）和樟科Lauraceae（如樟树 *Cinnamomum camphora*、椤木石楠 *Photinia davidsoniae*、毛豹皮樟 *Litsea coreana*）等耐荫性常绿阔叶树种为优势树种的常绿阔叶林[23-25]。因此沿着亚热带森林恢复演替梯度，根据植被恢复程度及其树种组成和结构，这些次生植物群落可以划分为灌草丛、灌木林、针阔混交林、落叶常绿阔叶混交林和常绿阔叶林[26]。森林类型更替是影响生态系统有机质循环的重要因素，它对森林生态系统的生产力、碳吸存和养分保持功能有影响。然而有关中亚热带凋落物层

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现存量及其 C、N、P 随着植被恢复的动态研究鲜有报道，对正确了解与认识随着植被恢复，凋落物层及各分解层现存量如何演变，土壤 N、P 含量增加，凋落物层及其各分解层凋落物 C/N、C/P、N/P 比值是否会相应的变化，凋落物层在生态系统物质循环过程中的作用是否增强等问题仍不十分清楚。因此，本研究采用空间差异代替时间序列的方法，在湘中丘陵区选取处于不同植被恢复阶段的 4 种林地（灌草丛、灌木丛、针阔混交次生林和常绿阔叶林）为作为一个恢复系列，比较研究不同恢复阶段林地凋落物层现存量及其 C、N、P 化学计量的变化特征，为亚热带地区退化林地的植被恢复和管理提供科学依据。

1 研究地概况

研究地设置在湖南省中东部的长沙县（113°17′ ～ 113°27′E，28°23′ ～ 28°24′N），属于典型低山丘陵区，地形起伏较大，坡度多在 20° ～ 30°，海拔约为 55 ～ 350 m；为亚热带东南季风湿润气候，年平均气温 17.0 ℃，极端高温为 40 ℃（7—8 月份），极端低温为 -11 ℃（1 月份），平均无霜期 216 ～ 269 d，雨量充沛，相对湿度较大，年降水量 1 412 ～ 1 559 mm，主要集中于 4—7 月份，年均日照 1 440 h。土壤以板岩和页岩发育而成的酸性红壤为主，地带性植被为亚热带常绿阔叶林，由于人为干扰（采伐、火烧、放牧）频繁，强度各异，原生地带性森林植被破坏比较严重。20 世纪 90 年代初开始实施封山育林，形成了多个处于不同恢复演替阶段的植物群落（灌草丛、灌木林、针阔混交林、常绿阔叶林），以及以杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林、马尾松人工林、湿地松 *Pinus elliottii* 人工林为主的人工林群落，为开展中亚热带森林植被恢复演替研究提供了良好的场所。

2 研究方法

2.1 样地设置和群落调查

2015 年 10 月，采用空间代替时间的研究方法，按照亚热带森林群落自然演替进程，根据人为干扰程度、植被恢复程度及其群落树种组成，选取地域毗邻、环境条件（立地、土壤、气候）基本一致，处于不同植被恢复阶段的 4 种植物群落：恢复早期阶段的檵木 *Loropetalum chinensis* －南烛 *Vaccinium bracteatum* －杜鹃 *Rhododendron mariesii* 灌草丛（LVR），恢复中期 I 阶段的檵木－杉木 *Cunninghamia lanceolata* －白栎 *Quercus fabri* 灌木林（LCQ），恢复中期 II 阶段的马尾松－柯（又名石栎，*Lithocarpus glaber*）－檵木针阔混交林（PLL），恢复后期（亚顶级）阶段的柯－红淡比 *Adinandra millettii* － 青 冈 *Cyclobalanopsis glauca* 常绿阔叶林（LAG）。4 个不同恢复演替阶段植物群落的基本概况如下：

1）LVR：天然常绿阔叶林采伐后，1966 年春炼山、人工整地，营造马尾松人工林，无施肥历史，1990 年皆伐马尾松人工林。1991 年以来，不断砍杂、放牧，2012 年停止人为干扰，当前自然恢复为檵木 + 南烛（*Vaccinium bracteatum*）+ 杜鹃灌草丛，草本植物多且生长较好，伴随许多幼小灌木。

2）LCQ：天然常绿阔叶林采伐后，1966 年春炼山、人工整地，营造杉木人工林，无施肥历史，1989–1990 年皆伐杉木人工林。之后每隔 3 ～ 5 a 砍伐一次，2004 年停止砍伐，当前自然恢复为檵木 + 杉木 + 白栎灌木林，灌木发育良好，但没有形成明显的乔木层，草本植物稀少。

3）PLL：20 世纪 60 年代末，天然常绿阔叶林采伐后自然恢复为马尾松 + 柯 + 檵木针阔混交林（PLL），林龄约 45 ～ 50 a，林下幼苗、幼树丰富，植株密度较大，但大径级植株比例不高 [27]。

4）LAG：长期以来无明显人为干扰，保存比较完好的柯 + 红淡比 + 青冈常绿阔叶林（LAG），群落结构相对稳定，林龄约 80 ～ 90 a。

根据不同恢复阶段植物群落物种组成及其结构的复杂程度，分别设置 3 ～ 4 个长期观测固定样地。LVR 群落设置 4 个 20 m×20 m 样地，LCQ 群落设置 3 个 20 m×20 m 样地，PLL、LAG 群落均设置 3 个 30 m×30 m 样地。

采用样方调查法，2016 年 10—11 月落叶树种落叶前完成群落调查，所有植物均鉴定到种。4 种群落的基本特征及其主要树种组成如表 1 所示。

2.2 凋落物层现存量的测定和分析样品采集、处理

于 2015 年 12 月，2016 年 4 月、6 月、10 月每一块固定样地分别沿对角线均匀设置 3 个 1 m×1 m 样方，根据凋落物层的分解层分层标准 [15]，测定样方内未分解层、半分解层、已分解层凋落物的湿重后，分别采集各分解层凋落物的分析样品（约 1.0 kg），将分析样品置于 80 ℃恒温烘干至恒质量，测定分析样品的含水率。根据分析样品的含水率，计算各样方不同分解层凋落物的干

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

质量，估算不同植被恢复阶段各分解层凋落物及整个凋落物层的现存量。取 4 次采样的平均值作为最终测定结果。

凋落物层分析样品烘干称干质量后，经植物粉碎机磨碎，过 60 目筛孔保存于样品瓶中，用于测定有机碳（C）、全氮（N）、全磷（P）含量。

表 1　不同植被恢复阶段样地的基本特征 †

Table 1　Stand characteristics at different vegetation restoration stages

恢复阶段 Restoration stage	优势植物 Dominant plants	组成比例 Composition proportion /%	木本植物密度 Density of woody plants /(株·hm^{-2})	多样性指数 Diversity index	重要值 Important value /%	平均胸径 Average DBH /cm	平均树高 Average tree hight /m	海拔 Elevation /m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope /(°)
檵木－南烛－满山红灌草丛 LVR	檵木 *Loropetalum chinense*	34.48	18 125	0.87	27.46	–	0.85	120 ～ 131	东南—西北	15 ～ 18
	南烛 *Vaccinium bracteatum*	21.55			18.96					
	满山红 *Rhododendron simsii planch*	12.07			14.00					
	白栎 *Quercus fabri*	7.76			10.66					
	板栗 *Castanea mollissima*	5.17			2.72					
	其他（8 种）Others（8 species）	18.97			26.20					
檵木－杉木－白栎灌木林 LCQ	檵木 *Loropetalum chinense*	17.47	7 633	1.06	22.02	2.74	3.37	120 ～ 135	东南—南	18 ～ 22
	杉木 *Cunninghamia lanceolata*	14.85			13.16					
	白栎 *Quercus fabri*	12.66			11.10					
	南烛 *Vaccinium bracteatum.*	12.66			9.26					
	木姜子 Litsea spp	11.35			10.13					
	其他（16 种）Others (16 species)	31.01			34.43					
马尾松－石栎－檵木针阔混交林 PLL	马尾松 *Pinus massoniana*	39.69	17 629	1.91	45.34	5.70	6.54	135 ～ 160	东坡—西北—南	18 ～ 20
	石栎 *Lithocarpus glaber*	25.52			13.87					
	檵木 *Loropetalum chinense*	11.06			7.43					
	红淡比 *Cleyera japonica*	3.59			4.11					
	连蕊茶 *Camellia cuspidata*	3.11			4.02					
	其他（22 种）Others (22 species)	17.03			25.23					
石栎－红淡比－青冈常绿阔叶林 LAG	石栎 *Lithocarpus glaber*	38.78	19 970	2.29	25.75	5.63	5.75	200 ～ 260	东南—南	20 ～ 22
	红淡比 *Cleyera japonica*	18.70			11.05					
	青冈 *Cyclobalanopsis glauca*	5.82			8.90					
	杉木 *Cunninghamia lanceolata*	5.36			6.14					
	格药柃 *Eurya muricata Dunn*	5.06			5.73					
	其他（31 种）Others (31 species)	26.28			42.44					

† 括号内的数据为每个群落中树木胸径或树高的变化范围。Values in parenthesis are the range of tree diameter at breast height (DBH) or height of each forest. LVR：*Loropetalum chinense* — *Vaccinium bracteatum* Thunb. — *Rhododendron mariesii* Hemsl. et Wils. scrub-grass-land，LCQ：*Loropetalum chinense* — *Cunninghamia lanceolata* — *Quercus fabri* Hance shrubbery, PLL: *Pinus massoniana* — *Lithocarpus glaber* — *Loropetalum chinense* coniferous-broad leaved mixed forest，LAG：*Lithocarpus glaber* — *Cleyera japonica* — *Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest。下同。The same below.

2.3　凋落物层样品中有机碳、全氮、全磷含量的分析方法

凋落物层分析样品中 C 含量用重铬酸钾 - 浓硫酸容量法测定，N 含量用 K9840 自动凯氏定氮仪（山东海能科学仪器有限公司，山东济南）测定，P 含量用碱熔 - 钼锑抗比色法测定。每个分析样品平行测定 2 次，取平均值作为该样品的测定结果。取 4 次采样的平均值作为最终测定结果。

2.4 数据统计与处理

凋落物层及各分解层 C、N、P 储量用以下公式估算：

$$D_L = W_L \times C_L$$

式中：D_L 为凋落物层或各分解层凋落物的 C（或 N、P）储量（kg/hm^2），W_L 为凋落物层或各分解层凋落物的现存量（kg/hm^2），C_L 为凋落物层或各分解层凋落物的 C（或 N、P）含量（g/kg）。

用 Excel 2016 统计各项指标的平均值和标准偏差。用 SPSS16.0 软件包中的单因素方差分析（One-way ANOVA）的的最小显著差数法（LSD，$P < 0.05$）分析不同恢复阶段林地凋落物层现存量，凋落物层 C、N、P 含量、储量及其化学计量比各项指标的差异显著性。图、表中的数据用“平均值 ± 标准偏差”表示。运用 SigmaPlot 12.5 软件制图。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结果与分析

3.1 不同植被恢复阶段林地凋落物层的现存量

如表 2 所示，凋落物层现存量随着植被恢复呈增加趋势，最高是最低的 4.97 倍，且 LVR 与 LCQ、PLL、LAG 差异显著（$P < 0.05$），而 LCQ、PLL、LAG 两两之间差异不显著（$P > 0.05$）。同一分解层凋落物现存量总体上也随着植被恢复而增加。在未分解层，PLL 最高，LVR 最低，且 LVR 与 LCQ、PLL、LAG 之间，LCQ 与 PLL 之间差异显著（$P < 0.05$），而 LCQ、PLL 与 LAG 差异不显著（$P > 0.05$）；在半分解层、已分解层，LAG 最高，LVR 最低，且 LVR 与 LCQ、PLL、LAG 差异显著（$P < 0.05$），LCQ、PLL、LAG 两两之间差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地，不同分解层凋落物现存量均表现为：已分解层＞半分解层＞未分解层，不同分解层之间的差异随着植被恢复而增大。其中，LVR 不同分解层之间差异不显著（$P > 0.05$），LCQ 未分解层、半分解层与已分解层差异显著（$P < 0.05$），但未分解层与半分解层差异不显著（$P > 0.05$），PLL 未分解层与已分解层差异显著（$P < 0.05$），半分解层与未分解层、已分解层差异不显著（$P > 0.05$）；LAG 不同分解层两两之间差异显著（$P < 0.05$）。未分解层凋落物现存量占凋落物层现存量的百分比最低，其次为半分解层，而已分解层最高，表明未分解层凋落物已被分解为半分解和已分解的凋落物。

表 2 不同恢复阶段林地凋落物层现存量 †

Table 2 Floor litter mass in different restoration stages

kg·hm^{-2}

分解层 Decomposition layers	檵木－南烛－杜鹃灌草丛 LVQ	檵木－杉木－白栎灌木林 LCQ	马尾松－柯－檵木针阔混交林 PLL	柯－红淡比－青冈常绿阔叶林 LAG
未分解层 Un-decomposed layer	428.22±328.16 Aa (27.30)	1 364.41±285.20 Ab (21.72)	1 900.77±679.83 Ac (26.82)	1 574.02±574.61 Abc (20.08)
半分解层 Semi-decomposed layer	487.90±236.91 Aa (31.11)	1 737.69±437.11 Ab (27.67)	2 135.32±648.38 Abb (30.14)	2 289.74±1 119.44 Bb (29.20)
已分解层 Decomposed layer	652.26±605.34 Aa (41.59)	3 178.77±1 307.74 Bb (50.61)	3 049.21±1 106.10 Bb (43.04)	3 976.90±1 711.81 Cb (50.72)
合计 Total	1 568.38±1 052.71 a	6 280.88±1 614.61 b	7 085.29±2 242.61 b	7 840.66±3 061.08 b

† 括号中数据为该层所占总体比例（%）。不同大写字母表示同一林地不同分解层之间差异显著（$P < 0.05$）；不同小写字母表示同一分解层不同林地之间差异显著（$P < 0.05$），下同。Values in parenthesis are the proportion of the layer over the whole litter horizon(%).Different capital letters represented significant differences between different decomposition state of litter in the same forest ($P < 0.05$), and different lower letters indicated significant differences between different forest at the same decomposition state of litter ($P < 0.05$). The same below.

3.2 凋落物层 C、N、P 含量和储量

3.2.1 C、N、P 的含量

如图 1 所示，凋落物层以及未分解层、半分解层、已分解层平均 C 含量分别为：277.20～424.10、371.71 ～ 502.73、288.52 ～ 453.19、171.36～316.38 g/kg，均以 PLL 为最高，LCQ 为最低，且 LVR 与 PLL 差异显著（$P < 0.05$），但与 LCQ、LAG 差异不显著（$P > 0.05$），LCQ、PLL、LAG 两两之间差异显著（$P < 0.05$）。同一林地，C 含量均随着凋落物的分解而下降，其中 LVR、LCQ、PLL 不同分解层两两之间差异显著（$P < 0.05$），LAG 未分解层与半分解层、已分解层差异显著（$P < 0.05$），但半分解层与已分解层差异不显著（$P > 0.05$）。

凋落物层及各分解层 N 平均含量总体上随着植被恢复而增加，且 LAG 与 LVR、LCQ、PLL（除已分解层外）差异显著（$P < 0.05$），而 LVR、LCQ、PLL 两两之间差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地 N 含量随着凋落物的分解而下降，除 PLL 外，其他 3 种林地不同分解层两两之间差异显著（$P < 0.05$）（图 1）。

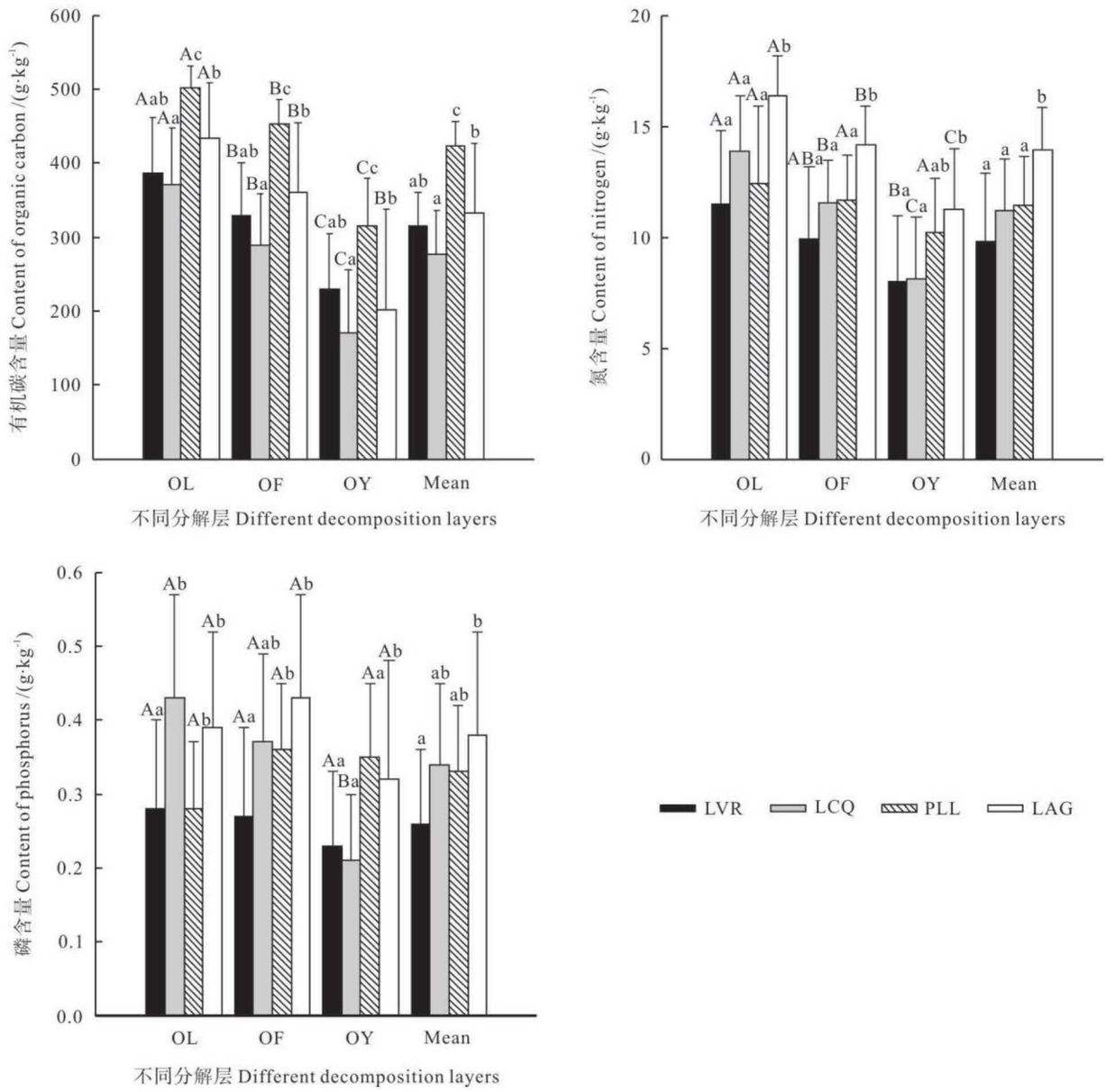
从图 1 可以看出，凋落物层及各分解层 P 平均含量总体上随着植被恢复而增加，且 LVR 与 LAG 差异显著（$P < 0.05$），与 LCQ（除未分解层外）、PLL（除已分解层外）差异不显著（$P > 0.05$），LCQ（除已分解层外）、PLL（除未分解层外）与 LAG 差异不显著（$P > 0.05$）。LVR、LCQ 各分解层凋落物 P 含量随着凋落物的分解而下降，而 PLL 半分解层 P 含量最高，未分解层最低，LAG 依次为：半分解层＞未分解层＞已分解层，LVR、PLL、LAG 不同分解层之间差异不显著（$P > 0.05$），LCQ 未分解层与已分解层差异显著（$P < 0.05$），但半分解层与未分解层、已分解层差异不显著（$P > 0.05$）。

3.2.2 C、N、P 的储量

从表 3 可以看出，PLL 凋落物层及其各分解层 C 储量最高，其次是 LAG，LVR 最低，且 PLL

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与LVR、LCQ、LAG（除半分解层、未分解层外）差异显著（$P < 0.05$），LAG与LVR、LCQ（除未分解层、已分解层外）差异显著（$P < 0.05$），LCQ与LVR差异显著（$P < 0.05$）。同一林地不同分解层凋落物C储量两两之间的差异均不显著（$P > 0.05$）。



OL：未分解层；OF：半分解层；OY：已分解层；Mean：平均值；不同大写字母表示同一林地不同分解层差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一分解层不同林地之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。OL: un-decomposed layer; OF: semi-decomposed layer; OY: decomposed layer; Values in parenthesis are the proportion of the layer over the whole litter horizon(%).Different capital letters represented significant differences between different decomposition state of litter in the same forest ($P < 0.05$), and different lower letters indicated significant differences between different forest at the same decomposition state of litter ($P < 0.05$). The same below.

图1　不同恢复阶段林地凋落物层碳、氮、磷含量

Fig. 1　Concentrations of carbon, nitrogen and phosphorus in litter layer at different restoration stages

凋落物层及各分解层N储量均随着植被恢复而增加，且LVR与LCQ、PLL、LAG差异显著（$P < 0.05$），LCQ、PLL（除未分解层、半分解层外）与LAG差异显著（$P < 0.05$），LCQ与PLL差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地，N储量均表现为：已分解层＞半分解层＞未分解层，LAG未分解层与半分解层、已分解层差异显著（$P < 0.05$），但半分解层与已分解层差异不显著（$P > 0.05$），其余3种林地不同分解层两两之间差异不显著（$P > 0.05$）（表3）。

如表3所示，凋落物层及各分解层P储量总体上随着植被恢复而增加，且LVR与LCQ、PLL、LAG差异显著（$P < 0.05$），LCQ与PLL（除未分解层、半分解层外）、LAG差异显著（$P < 0.05$），但PLL与LAG差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地，P储量也表现为：已分解层＞半分解层＞未分

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

解层，LVR、LCQ 不同分解层两两之间差异不显著（$P > 0.05$），PLL、LAG 未分解层与半分解层、已分解层差异显著（$P < 0.05$），半分解层与已分解层差异不显著（$P > 0.05$）。

表 3 不同恢复阶段林地凋落物层 C，N，P 储量

Table 3 Carbon, nitrogen and phosphorus storage of litter layers at different restoration stages kg·hm^{-2}

项目 Item	分解层 Decomposition layers	檵木－南烛－杜鹃灌草丛 LVR	檵木－杉木－白栎灌木林 LCQ	马尾松－柯－檵木针阔混交林 PLL	柯－红淡比－青冈常绿阔叶林 LAG
C 储量 Carbon stock	未分解层 Un-decomposed layer	161.07±111.97 Aa	503.05±123.23 Ab	957.70±348.44 Ac	665.22±237.55 Ab
	半分解层 Semi-decomposed layer	153.38±62.27 Aa	495.15±156.75 Ab	966.22.±309.74 Ac	810.80±454.78 Ac
	已分解层 decomposed layer	140.48±125.65 Aa	524.83±248.95 Ab	955.39±403.10 Ac	730.91±660.49 Abc
	合计 Total	454.93±269.29 a	1523.02±365.95 b	2879.31±952.23 c	2206.93±1158.81 d
N 储量 Nitrogen stock	未分解层 Un-decomposed layer	4.73±3.67 Aa	18.94±4.93 Ab	22.71±7.56 Abc	26.05±10.75 Ac
	半分解层 Semi-decomposed layer	4.77±2.89 Aa	19.95±5.32 Ab	24.94±8.89 Abc	33.23±19.15 ABc
	已分解层 decomposed layer	4.81±4.36 Aa	23.78±8.39 Ab	31.27±15.01 Ab	45.02±24.30 Bc
	合计 Total	14.31±9.83 a	62.67±13.90 b	78.92±26.11 b	104.29±48.74 c
P 储量 Phosphorus stock	未分解层 Un-decomposed layer	0.11±0.08 Aa	0.59±0.20 Ab	0.53±0.29 Ab	0.60±0.31 Ab
	半分解层 Semi-decomposed layer	0.13±0.08 Aa	0.64±0.27 Ab	0.77±0.33 Bbc	0.98±0.60 ABc
	已分解层 decomposed layer	0.14±0.09 Aa	0.65±0.37 Ab	1.07±0.55 Bc	1.22±0.79 Bc
	合计 Total	0.38±0.30 a	1.87±0.70 b	2.37±1.11 c	2.80±1.48 c

3.3 凋落物层 C、N、P 化学计量比

从图 2 可以看出，凋落物层及各分解层 C/N 比值均表现为：PLL > LVR > LCQ > LAG，且 LVR、PLL 与 LCQ、LAG 差异显著（$P < 0.05$），但 LVR 与 PLL 之间，LCQ 与 LAG 之间差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地，C/N 比值总体上随着凋落物的分解而下降，与 C 含量的变化趋势基本一致，LVR、LCQ 不同分解层两两之间差异不显著（$P > 0.05$），PLL、LAG 已分解层与未分解层、半分解层差异显著（$P < 0.05$），而未分解层与半分解层差异不显著（$P > 0.05$）。

如图 2 所示，凋落物层、半分解层、已分解层 C/P 比值均以 LVR 最大，其次为 PLL，LCQ 或 LAG 最小，且 LVR 与 LCQ（除已分解层外）、LAG 差异显著（$P < 0.05$），与 PLL 差异不显著（$P > 0.05$），LCQ、PLL、LAG 两两之间差异不显著（$P > 0.05$）。未分解层 C/P 比值为：PLL > LVR > LAG > LCQ，且 PLL 与 LCQ、LAG 差异显著（$P < 0.05$），与 LVR 差异不显著（$P > 0.05$），LVR 与 LCQ 差异显著（$P < 0.05$），而与 LAG 差异不显著（$P > 0.05$），LCQ 与 LAG 差异不显著（$P > 0.05$）。同一林地，C/P 比值随着凋落物的分解而下降，LVR、LCQ 不同分解层两两之间差异不显著（$P > 0.05$），PLL 未分解层与半分解层、已分解层差异显著（$P < 0.05$），而半分解层与已分解层差异不显著（$P > 0.05$）；LAG 未分解层与已分解层差异显著（$P < 0.05$），而半分解层与未分解层、已分解层差异不显著（$P > 0.05$）。

凋落物层、半分解层 N/P 比值为：LVR > LAG > PLL > LCQ，未分解层为：PLL > LVR > LAG > LCQ，已分解层为：LCQ > LAG > LVR > PLL，但凋落物层及各分解层不同林地两两之间差异均不显著（$P > 0.05$）。同一林地，LVR、PLL 的 N/P 比值随着凋落物的分解而下降，LCQ、LAG 呈先下降再升高，但 4 种林地不同分解层之间（除 PLL 外）差异不显著（$P > 0.05$）（图 2）。

4 讨 论

4.1 植物恢复对凋落物层现存量的影响

研究表明，群落凋落物层现存量主要取决于两个因素，即与凋落物量呈正相关，与分解速率呈负相关[28]。因而凋落物层现存量受到生物和非生物多个因素的共同影响[29]。研究表明，同一气候条件下，不同植物群落由于组成树种不同，凋落物产量及其分解速率的差异，使得不同植物群落凋落物层及其各分解层凋落物现存量不同[10-11,30]。本研究中，凋落物层以及各分解层凋落物现存量总体上随着植被恢复而逐渐增加，与张庆费等、郑路等的研究结果基本一致[32,15]。进一步分析表明，凋落物层现存量与群落植物多样性指数（表 1）呈极显著正相关关系（r=0.720，$P < 0.05$，n=13），表明随着植被恢复，树种组成增多，植物多样性提高是凋落物层现存量增加的主要影响因子之一。

本研究中，不同恢复阶段林地同一分解层现存量占凋落物层现存量的百分比不同，未分解层为

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

20.08%～27.30%，半分解层为 27.67%～31.11%，已分解层为 41.59%～50.72%，表明不同林地凋落物层的分解强度不同。究其原因可能是：一方面，随着植被恢复，物种种类增加且物种组成不断改变，大型树木比例增加（表 1），新陈代谢加快，凋落物量增加[31]；另一方面，不同恢复阶段群落内微环境（光照、温度、湿度等）不同，凋落物的分解速率不同，地表凋落物层现存量也不同。

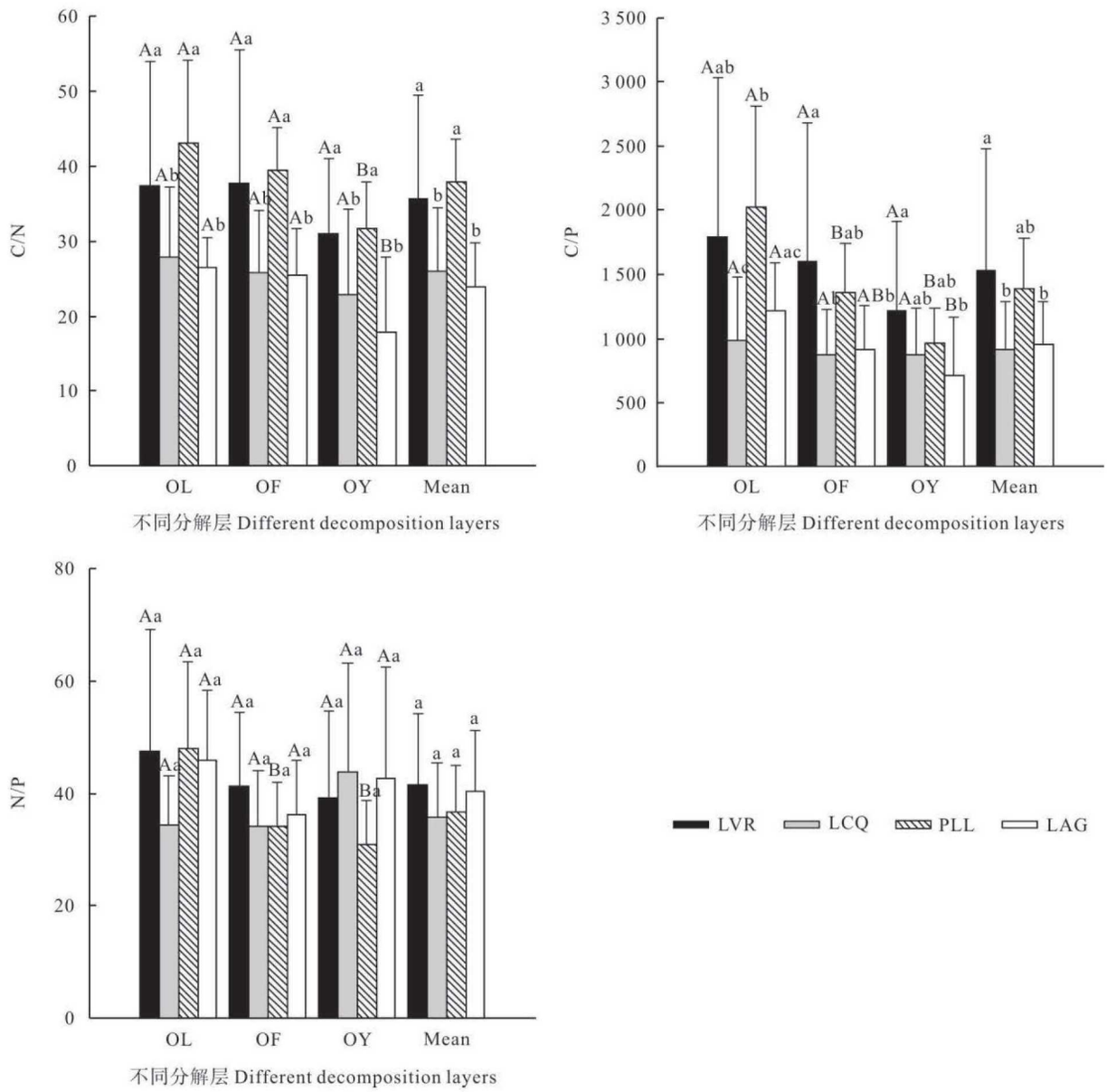


图 2　不同恢复阶段林地凋落物碳、氮、磷化学计量比

Fig. 2　Carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometry ratios of litter layer at different different restoration stages

研究表明，未分解层凋落物现存量除了与群落的凋落物量有关外，还与外界环境条件、凋落物特性有关[32]。本研究中，由于 PLL 以马尾松为优势树种（表 1），凋落物以马尾松针叶为主，凋落物层 C/N 比值保持较高（图 2），分解速率较低，未分解层凋落物积累多，而 LAG 凋落物以阔叶树叶为主（表 1），C/N 比值较低（图 2），分解速率较高，未分解层凋落物被分解为半分解层和已分解层凋落物而积累较少，导致 PLL 未分解层凋落物现存量高于 LAG，而半分解层和已分解层凋落物现存量低于 LAG，甚至已分解层凋落物现存量低于 LCQ，表明随着植被恢复，LAG 凋落物能迅速分解归还养分，更有利于土壤养分的保持与积累。

凋落物分解是一个复杂而又漫长的过程，包括物理、化学和微生物 3 种分解方式[33]。分解初期，由于水溶性物质和碳水化合物的快速淋失与降解，凋落物分解速率较高，随着凋落物的分解，纤维素、

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

木质素等难以降解的物质不断积累，使得分解中期或后期凋落物分解速率下降[34]，导致半分解或已分解凋落物的积累。本研究中，同一林地，不同分解层凋落物现存量随着凋落物的分解而增加，占凋落物层现存量的百分比增大，可能与不同分解阶段凋落物的分解速率有较大关系[35]。表明未分解层凋落物向半分解层和已分解层迁移，有机质向土壤归还，有利于土壤肥力的增加[15]，且随着植被恢复，这种迁移能力逐渐增强，说明随着植被恢复，凋落物分解速率会提高[21]，土壤微生物活动增强，被分解的凋落物越来越多，未分解层凋落物现存量越来越少。

4.2 植被恢复对凋落物层 C、N、P 含量及其化学计量比的影响

由于针叶树具有特殊的养分获取方式，其针叶 C 含量较阔叶树高 1.6% ～ 3.4%[36]；相反，针叶树针叶 N，P 含量普遍低于阔叶树[37]。本研究中，PLL 以马尾松为优势树种，凋落物以马尾松针叶为主，而 LVR 以小灌木和草本植物为主，LCQ 以落叶灌木为主，LAG 以阔叶树为主，因而 PLL 未分解层凋落物 C 含量显著高于 LCQ、LAG；相反，PLL 未分解层凋落物 N，P 含量低于 LCQ、LAG，这也是 PLL 未分解层凋落物 C/N、C/P 比值显著高于 LCQ、LAG 的原因。研究表明，凋落物 C 含量随着凋落物的分解呈显著单调下降[38]。本研究中，4 种不同恢复阶段林地凋落物层 C 含量随着凋落物的分解而下降。但与多种林分类型相比，马尾松林凋落物层 C 含量随着凋落物分解下降速率最小[39-40]。因此，PLL 半分解层、已分解层凋落物 C 含量仍显著高于 LCQ、LAG，而 PLL 半分解层、已分解层 N、P 含量仅略高于 LCQ，仍低于 LAG，使得 PLL 半分解层、已分解层凋落物 C/N、C/P 比值仍高于 LCQ、LAG，特别是 C/N 比值显著高于 LCQ、LAG。

本研究中，C/N 比值基本上随着植被恢复呈下降趋势，与马文济等的研究结果一致[21]。也由于 C、N 含量随着凋落物分解而下降，但 C 含量下降幅度比 N 含量更为明显，因此，C/N 比值随着凋落物的分解而下降，与 C 含量的变化趋势一致。由于未分解层凋落物 C/N、C/P 比值较高时，凋落物分解过程中出现 N、P 富集现象或慢缓释放，从而导致半分解层、已分解层凋落物 N、P 含量仍维持较高的水平，C/P 比值大体上随着凋落物的分解而下降。但由于不同恢复阶段林地凋落物 N、P 含量及其随着凋落物分解的变化程度不同，因此，N/P 比值随着凋落物分解没有呈现一致的变化趋势。

本研究中，4 种不同植被恢复阶段林地未分解层凋落物 N、P 含量分别为 11.53 ～ 16.39、0.28 ～ 0.43 g/kg，与全球衰老叶片的 N、P 含量[41]相比，P 含量较低，而 N 含量较高，与全球木本植物凋落叶 N、P 含量（10.9、0.85 g/kg）[42]相比，也呈现高 N 含量，低 P 含量。此外，4 种林地未分解层凋落物的 C/N 比值（26.57 ～ 43.18）与长白山次生针阔混交林凋落物初始的 C/N 比值（31 ～ 70）接近，而 C/P（984.03 ～ 2 026.60）、N/P（34.38 ～ 47.88）比值显著高于长白山次生针阔混交林凋落物初始的 C/P（381 ～ 876）和 N/P（8.6 ～ 20.0）比值[38]，表明研究区植物生长发育明显受到 P 的限制，也可能是由于高纬度和低温的影响，北方森林土壤养分（N，P）相对丰富，森林凋落物养分（N，P）含量高于低纬度地区[43]；此外，不同地区植物群落类型及其组成树种的差异，可能也是不同地区凋落物层 C，N，P 含量及化学计量比不同的原因。

4.3 植被恢复对凋落物层 C、N、P 储量的影响

凋落物层及各分解层 C、N、P 储量主要取决于凋落物层及各分解层的现存量和 C、N、P 的含量。由于凋落物层及各分解层凋落物现存量和 N、P 含量基本上随着植被恢复而增加，而 PLL 凋落物层 C 含量显著高于 LAG，因此，C 储量以 PLL 为最高，其次是 LAG，LVR 最低，而 N、P 储量随着植被恢复而增加。也由于凋落物层 N、P 含量随着植被恢复的变化幅度比凋落物层现存量小，凋落物层 N、P 储量主要取决于凋落物层现存量，因而 N、P 储量的变化趋势与凋落物层现存量基本一致。不管是凋落物层现存量还是 C、N、P 储量随着植被恢复呈增加趋势，且养分储量向腐殖质层转移增强，因此促进植被恢复可明显提高林地养分的蓄存量。

在植被恢复过程中，地上植物组成不断改变，凋落物组成和数量也随之发生变化，因此本研究的数据和结论只能说明当前的研究结果，要准确地反映植被恢复对凋落物层现存量及其 C、N、P 化学计量的影响还需要长期定位研究，深入揭示植物组成的变化对凋落物层现存量的影响；此外，凋落物分解和养分释放受到多种因素（如土壤微生物、动物以及林下微环境的改变等）的综合影响，因此不同植被恢复阶段凋落物分解过程中，各因素及其综合的驱动机制还有待进一步研究。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结　论

随着植被恢复，凋落物层及其各分解层现存量增加，未分解层凋落物向半分解层和已分解层的迁移能力逐渐增强；PLL 凋落物层及其各分解层 C 含量、储量最高，其次是 LAG；随着植被恢复，凋落物层及各分解层 N、P 含量、储量总体上呈增加趋势，而 C/N、C/P、N/P 比值总体上呈下降趋势，有利于凋落物的分解及其养分释放。表明植被恢复促进了生态系统养分生物循环和自我维持机制的形成，有利于土壤养分的保持与积累，体现了生态系统物质循环随着植被恢复逐渐优化。

参考文献：

[1] VASCONCELOS H L, LUIZAO F J. Litter production and litter nutrient concentrations in a fragmented Amazonian landscape[J]. Ecological Applications, 2004,14(3):884-892.

[2] BERG B, TAMM C O. Decomposition and nutrient dynamics of litter in long-term optimum nutrition experiments[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1991,6:305-321.

[3] 金小麟 . 华北地区针叶林下凋落物层化学性质的研究 [J]. 生态学杂志 ,1991,10(6):24-29.
JIN X L. Chemical properties of litter layer under major coniferous forests in northern China[J].Chinese Journal of Ecology, 1991,10(6):24-29.

[4] 廖军 , 王新根 . 森林凋落量研究概述 [J]. 江西林业科技 , 2000(1):31-34.
LIAO J,WANG X G.Summary of forest litter research[J].Jiangxi Forestry Science and Technology, 2000(1):31-34.

[5] 吴承祯 , 洪伟 , 姜志林 , 等 . 我国森林凋落物研究进展 [J]. 江西农业大学学报 ,2000,22(3):405-410.
WU C Z, HONG W, JIANG Z L, *et al*. Advances in research of forest litter-fall in China[J]. Acta Agriculturae Universitis Jiangxiensis, 2000,22(3):405-410.

[6] BERG B,STAAF H.Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter[J].Ecological Bulletins, 1981,33:163-178.

[7] KAMRUZZAMAN M, SHARMA S, RAFIQUL HOQUE A T M, *et al*. Litterfall of three subtropical mangrove species in the family[J]. Journal of Oceanography, 2012,68(6):841-850.

[8] 林波 , 刘庆 , 吴彦 , 等 . 森林凋落物研究进展 [J]. 生态学杂志 , 2004,23(1):60-64.
LIN B, LIU Q, WU Y, *et al*. Advances in the studies of forest litter[J]. Chinese Academy of Sciences, 2004,23(1):60-64.

[9] HOSSAIN M,SIDDIQUE M R H,RAHMAN M S, *et al*. Nutrient dynamics associated with leaf litter decomposition of three agroforestry tree species (*Azadirachta indica*, *Dalbergia sissoo* and *Melia azedarach*) of Bangladesh[J]. Journal of Forestry Research, 2011,22(4):557-582.

[10] KAVVADIAS V A, ALIFRAGIS D, TSIONTSIS A, *et al*. Litterfall litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece[J]. Forest Ecology and Management, 2001,144:113-127.

[11] VITOUSEK P M. Litterfall nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests[J]. Ecology,1984,65(1):285-298.

[12] 胡亚林 , 汪思龙 , 黄宇 , 等 . 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报 ,2005,25(10):2662-2668.
HU Y L, WANG S L, HUANG Y, *et al*. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(10):2662-2668.

[13] 邓秀秀 , 王忠诚 , 李程 , 等 . 浙江天童常绿阔叶林凋落物量季节动态及其与气象因子的关系 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2017,37(3):73-78.
DENG X X, WANG Z C, LI C, *et al*. Seasonal dynamics of the litter fall production of evergreen broadleaf forest and its relationships with meteorological factors at Tiantong of Zhejiang province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(3):73-78.

[14] 余广彬 , 杨效东 . 不同演替阶段热带森林地表凋落物和土壤节肢动物群落特征 [J]. 生物多样性 ,2007,15(2):188-198.
YU G B, YANG X D. Characteristics of litter and soil arthropod communities at different successional stages of tropical forests[J]. Biodiversity Science,2007,15(2):188-198.

[15] 郑路 , 卢立华 . 我国森林地表凋落物层现存量及养分特征 [J]. 西北林学院学报 ,2012,27(1):63-69.
ZHENG L, LU L H. Standing crop and nutrient characteristics of forest floor litter in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012,27(1):63-69.

[16] 阎凯 , 付登高 , 何峰 , 等 . 滇池流域富 P 区不同土壤 P 水平下植物叶片的养分化学计量特征 [J]. 植物生态学报 ,2011,35(4): 353-361.
YAN K, FU D G, HE F, *et al*. Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the lake Dianchi watershed, southwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011,35(4):353-361.

[17] 李征 , 韩琳 , 刘玉虹 , 等 . 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. 植物生态学报 ,2012,36(10):1054-1061.
LI Z,HAN L, LIU Y H, *et al*. C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different phase in coastal wetlands of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2012,36(10):1054-1061.

[18] 张珂，何明珠，李欣荣，等. 阿拉善荒漠典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征研究 [J]. 生态学报，2014,34(22):6538-6547.
ZHANG K, HE M Z, LI X R, *et al*. Foliar carbon,nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(22):6538-6547.

[19] 刘万德，苏建荣，李帅锋，等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报，2010,30(23):6581-6590.
LIU W D, SU J R, LI S F, *et al*. Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Puer, Yunnan province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(23):6581-6590.

[20] 刘兴诏，周国逸，张德强，等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征 [J]. 植物生态学报，2010,34(1):64-71.
LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, *et al*. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010,34(1):64-71.

[21] 马文济，赵延涛，张晴晴，等. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的 C:N:P 化学计量特征 [J]. 植物生态学报，2014,38(8):833-842.
MA W J, ZHAO Y T, ZHANG Q Q, *et al*. C:N:P stoichiometry in forest floor litter of evergreen broad-leaved forests at different successional stages in Tiantong,Zhejiang, eastern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014,38(8):833-842.

[22] 左巍，贺康宁，田赟，等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征 [J]. 生态学杂志，2016,35(9):2271-2278.
ZUO W, HE K N, TIAN Y, *et al*. Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region,Qinghai,China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(9):2271-2278.

[23] 贺金生，陈伟烈. 中国亚热带地区退化生态系统：类型、分布、结构及恢复途径 [A]. 陈灵芝，陈伟烈，韩兴国. 中国退化生态系统研究 [C]. 北京：中国科学技术出版社，1995.
HE J S, CHEN W L. Degraded ecosystems in subtropical China: types, distribution,structure and restoration pathways[A]. CHEN L Z, CHEN W L, HAN X G. Research on degraded ecosystems in China[C]. Beijing:China Science and Technology Press, 1995.

[24] LI X, WILSON S D, SONG Y. Secondary succession in two sub-tropical forests[J]. Plant Ecology, 1999,143(1):13-21.

[25] 丁圣彦，宋永昌. 演替研究在常绿阔叶林抚育和恢复上的应用 [J]. 应用生态学报，2003,14(3):423-426.
DING S Y, SONG Y C. Application of succession study in tending and restoration of evergreen broadleaved forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(3):423-426.

[26] XIANG W H, ZHOU J, OUYANG S, *et al*. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern china[J]. European Journal of Forest Research, 2016,135(5):963-979.

[27] 陈金磊，方晰，辜翔，等. 中亚热带 2 种森林群落组成、结构及区系特征 [J]. 林业科学，2019,55(2):159-172.
CHEN J L, FANG X, GU X, *et al*. Composition, structure, and floristic characteristics of two forest communities in the central-subtropical China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,55(2):159-172.

[28] 黄宗胜，符裕红，喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复中凋落物现存量及其碳库特征演化 [J]. 林业科学研究，2013,26(1):8-14.
HUANG Z S, FU Y H, YU L F. Evolution of litterfall accumulation and the characteristics of its carbon pool in the process of natural restoration of Karst forest vegetation[J]. Forest Research, 2013,26(1):8-14.

[29] 原作强，李步杭，白雪娇，等. 长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态 [J]. 应用生态学报，2010,21(9):2171-2178.
YUAN Z Q, LI B H, BAI X J, *et al*. Composition and seasonal dynamics of litter falls in a broad-leaved Korean pine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(9):2171-2178.

[30] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure[J]. The Botanical Review, 1991,57(1):1-32.

[31] 吕晓涛，唐建维，何有才，等. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征 [J]. 植物生态学报，2007,31(1):11-22.
LYU X T, TANG J W, HE Y C, *et al*. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007,31(1):11-22.

[32] 张庆费，徐绒娣. 浙江天童常绿阔叶林演替过程的凋落物层现存量 [J]. 生态学杂志，1999,18(2):17-21.
ZHANG Q F, XU R D.Standing crops of the litter fall in the succession series of evergreen broad-leaved forest in Tiantong Zhejiang province[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999,18(2):17-21.

[33] 苏静，马姜明，覃扬浍，等. 桂林岩溶石山檵木群落不同恢复阶段凋落物层酶对凋落物分解的影响 [J]. 广西植物，2019,39(2):170-177.
SU J, MA J M, QIN Y H, *et al*. Effects of litter layer enzyme on litter decomposition of *Loropetalum chinense* communities at different restoration stages in karst hills of Guilin[J]. Guihaia, 2019,39(2):170-177.

[34] 郭剑芬，杨玉盛，陈光水，等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. 林业科学，2006,42(4):93-100.
GUO J F, YANG Y S, CHEN G S, *et al*. A review on litter decomposition in forest ecosystem[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006,42(4):93-100.

[35] 谌贤，刘洋，邓静，等. 川西亚高山森林凋落物不同分解阶

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

段碳氮磷化学计量特征及种间差异 [J]. 植物研究 ,2017,37(2): 216-226.

SHEN X, LIU Y, DENG J, *et al*. C, N and P stoichiometry at different stages of litter decomposition in subalpine forest of western Sichuan province and interspecies comparison[J]. Bulletin of Botanical Research, 2017,37(2):216-226.

[36] 马钦彦 , 陈遐林 , 王娟 , 等 . 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. 北京林业大学学报 ,2002,24(5/6):96-100.

MA Q Y, CHEN X L, WANG J, *et al*. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002,24(5/6):96-100.

[37] LIU C, BERG B, KUTSCH W, *et al*. Leaf litter nitrogen concentration as related to climatic factors in Eurasian[J]. Global Ecology and Biogeography, 2006,15(5):438-444.

[38] 李雪峰 , 韩士杰 , 胡艳玲 , 等 . 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系 [J]. 应用生态学报 , 2008,19(2):245-251.

LI X F,HAN S J, HU Y L, *et al*. Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broad leaf mixed forest in Changbai mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008,19(2):245-251.

[39] 李正才 , 徐德应 , 杨校生 , 等 . 北亚热带 6 种森林类型凋落物分解过程中有机碳动态变化 [J]. 林业科学研究 ,2008,21(5): 675-680.

LI Z C, XU D Y, YANG X S, *et al*. Carbon dynamics of litter decomposition in six forest stands of subtropical China[J]. Forest Research, 2008,21(5):675-680.

[40] 喻林华 , 方晰 , 项文化 , 等 . 亚热带 4 种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征 [J]. 林业科学 ,2016,52(10):11-21.

YU L H, FANG X, XIANG W H, *et al*. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter and soil of four types of subtropical stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016,52(10):11-21.

[41] YUAN Z, CHEN H Y H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus[J]. Global Ecology & Biogeography, 2009,18(5):532-542.

[42] KANG H Z, XIN Z J, BERG B, *et al*. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. Annals of Forest Science, 2010,67(8):811-818.

[43] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences (USA), 2004,101(30):11001-11006.

[本文编校：吴　彬]

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net