

DOI: 10.5846/stxb201311042663

赵晶, 闫文德, 郑威, 李忠文. 樟树人工林凋落物养分含量及归还量对氮沉降的响应. 生态学报, 2016, 36(2): - .

Zhao J, Yan W D, Zhen W, Li Z W. Nutrient Contents and Fluxes in the litterfall from *Cinnamomum camphora* plantation in Response to Simulated Nitrogen Deposition. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - .

樟树人工林凋落物养分含量及归还量对氮沉降的响应

赵 晶^{1,2}, 闫文德^{1,2,3,*}, 郑 威^{1,2}, 李忠文^{1,2}

1 中南林业科技大学, 长沙 410004

2 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004

摘要: 氮沉降的持续增加对陆地生态系统的健康发展构成严重威胁, 森林是陆地生态系统中重要的组成部分, 大量的氮沉降对其结构和功能造成严重影响。凋落物是森林生态系统养分循环的重要组成部分, 它对土壤肥力、森林生态系统养分循环等方面具有重要作用。为了探讨亚热带常绿阔叶森林凋落物对氮沉降增加的响应, 在湖南省森林植物园以樟树人工林为研究对象进行模拟氮沉降的实验, 实验设置 4 种氮添加水平 CK ($0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 对照), LN ($5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), MN ($15 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), HN ($30 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 研究氮沉降对樟树林年凋落物量、凋落物养分含量以及归还量的影响。结果表明: 不同施氮水平下 (CK、LN、MN、HN), 樟树林凋落物的年凋落量分别为 4.53 ± 0.32 、 3.95 ± 0.28 、 3.56 ± 0.41 、 $4.46 \pm 0.48 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 施氮抑制了樟树林的凋落量, 且低、中氮处理下差异显著 ($P < 0.05$); 施氮处理后凋落物的养分含量大小顺序为: $\text{C} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$, 凋落物的碳含量没有显著变化, 但氮含量都有所增加, 因此, 施氮降低了樟树凋落物各组分的 C/N 比; 凋落物中元素的年归还量大小顺序表现为: $\text{C} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$, 施氮处理对凋落物 C、K、Ca、Mg 归还量有抑制作用, 但对凋落物 N 归还量表现为促进作用。

关键词: 氮沉降; 樟树林; 凋落物; 养分

Nutrient Contents and Fluxes in the litterfall from *Cinnamomum camphora* plantation in Response to Simulated Nitrogen Deposition

ZHAO Jing^{1,2}, YAN Wende^{1,2,3,*}, ZHEN Wei^{1,2}, LI Zhongwen^{1,2}

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 South Forestry Ecological Application Technology National Engineering Laboratory, Changsha 410004, China

3 City of Hunan Province Key Laboratory of Forest Ecology, Changsha 410004, China

Abstract: Nitrogen deposition is a serious threat to the healthy development of the terrestrial ecosystem. Forests are the important part of terrestrial ecosystem, and high levels of nitrogen deposition seriously influence forest structure and function. Litter is an important part of forest ecosystem nutrient cycling, which has an important role in the soil, forest ecological. We investigated the effects of Control (CK, no nitrogen fertilization), low nitrogen (LN, $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), medium nitrogen (MN, $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and high nitrogen (HN, $30 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) treatments on the nutrient contents and fluxes caused by litterfalls in a subtropical *Cinnamomum camphora* plantation located in Hunan Province, China. According to the results, the annual litterfall production in CK, LN, MN, and HN was 4.53 ± 0.32 , 3.95 ± 0.28 , 3.56 ± 0.41 , and $4.46 \pm 0.48 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively, suggesting that low-to-medium N deposition decreased the litterfall production significantly. The order of nutrient contents was $\text{C} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$, after nitrogen fertilization. Furthermore, the

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201404316); 湖南省自然科学创新研究群体基金 (湘基金委字 [2013] 7 号); 湖南省高校创新平台开放基金项目 (12K070); 国家林业局软科学研究项目 (2013-R09); 城市森林生态湖南省重点实验室资助

收稿日期: 2013-11-04; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

nitrogen content of litter had little impact on the carbon content. However, the N treatments (LN, MN, HN) decreased C/N ratios, compared with CK. The order of nutrient fluxes was $C > N > Ca > K > Mg$, and nitrogen fertilization reduced the amount of C, K, Ca, and Mg fluxes, but increased the N flux.

Key Words: nitrogen deposition, *Cinnamomum camphora* plantation, Litter, Nutrient

近几十年来,由于矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产及使用、人口增长和畜牧业发展等,工业活动越来越多地向大气中排放各种含氮化合物^[1-3],引起大气氮沉降成比例增加^[4],导致土壤或水体的富营养化、酸化,严重威胁着水体和陆地生态系统的健康发展,甚至危害到人类健康^[5-6]。目前我国已成为继欧洲和美国之后的第三大沉降区^[7],随着经济工农业等的迅速发展,我国的氮沉降量还会继续升高,氮沉降的现状和未来的发展趋势将更加严峻^[8]。因此,氮沉降增加已引起了科学家和公众的广泛关注^[9]。

20 世纪 80 年代初以来,欧美开展了关于氮沉降对森林结构和功能影响的研究,研究内容不断拓宽,并逐渐形成网络^[10]。在氮沉降持续增加的背景下^[8],我国也逐步开始了这方面的研究^[1,11],例如,2002 年 10 月,莫江明等在广东鼎湖山生物圈保护区选择南亚热带代表性的森林生态系统建立了永久性的试验样地,通过人工模拟方法系统地研究氮沉降对南亚热带森林生态系统结构和功能影响及其机理^[2]。经过十几年模拟氮沉降试验,我国已积累了较多的研究成果,在 2013 年 9 月,中科院华南植物园傅声雷研究员等科研人员完成“一种林冠模拟氮沉降和降雨野外控制实验系统”获得国家实用新型专利授权^[12]。

森林是陆地生态系统中重要的组成部分^[13],也是大面积氮沉降的直接承受者^[14]。大量的研究表明,大气氮沉降的显著增加对森林生态系统的结构和功能构成了严重的威胁^[15]。凋落物是森林生态系统养分循环的重要组成部分,它通过养分循环将植物体营养物质输送到土壤^[16],对土壤肥力、土壤理化性质、植物生产力及森林生态系统碳循环方面具有重要作用^[17-18]。因此,在氮沉降全球化的背景下,研究氮沉降对凋落物养分含量的影响尤为重要。樊后保等^[15,19-20]详细研究了杉木人工林凋落物养分含量对氮沉降的响应,而氮沉降对樟树人工林凋落物养分含量影响的研究鲜有报道。因此,本文选取亚热带常绿阔叶林代表树种樟树作为研究对象,探讨氮沉降对樟树人工林凋落物养分含量及归还量的响应规律,为亚热带地区碳库和碳循环研究提供基础数据^[21],弥补了中国亚热带地区关于森林生态系统对氮沉降响应特征和机制的研究的不足,为我国进一步开展氮沉降研究打下基础^[19,22]。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于湖南省森林植物园(113°02′—03′ E, 28°06′—07′ N),海拔 50—100m,坡度 12°—21°;属典型红壤丘陵区,地层主要是第四纪更新世的冲积性网纹红土和砂砾;该地区年均气温约为 17.2℃,7 月份最热,平均 29.4℃,极端最高气温 40.6℃;1 月份最冷,平均 4.7℃,极端最低温度-11.3℃,属于典型的亚热带湿润季风气候;全年无霜期为 270—310d;雨量充沛,年平均降水量约为 1422mm;年均日照时数为 1677.1h。

林下植被主要有青桐(*Firmiana simplex*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)、毛叶木姜子(*Litsea mollis* hemsl.)、油茶(*Camellia oleifera*)、山麦冬(*Radix Liriope*)、苔草(*Carex tristachya*)、一枝黄花(*Solidago canadensis*)、蛇葡萄(*Ampelopsis sinica*)、杜荆(*Vitex agnus castus*)、大青(*Clerodendron cyrtophyllum*)、黄檀(*Dalbergia balansae*)等。

林分的基本情况见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

选择林分条件相似的樟树人工林建立 12 块固定的试验样地,每块样地大小为 25m×25m。对样地林分的

本底值调查后,开始进行实验样地的设计与处理。根据当地森林的氮沉降背景($29\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)和参考其它同类研究^[23],共设置对照(CK,no N added),低氮(LN, $5\text{g N m}^{-2}\text{ a}^{-1}$),中氮(MN, $15\text{g N m}^{-2}\text{ a}^{-1}$),高氮(HN, $30\text{g N m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)4种氮添加水平,各水平设置3块重复样地。添加氮素为 NH_4NO_3 ,将每个样方所需要喷洒的 NH_4NO_3 溶解在20L自来水中,采用喷雾器均匀喷洒至样地,对照样方仅喷洒20L自来水。2010年5月,首次进行施氮处理,每年施氮分两次进行,分别于干湿交替季的5月、10月等量施加^[24]。

表1 樟树林的林分特征和土壤性质

Table 1 Background values of the stand and soil properties in *Cinnamomum camphora* plantation

胸径 DBH /cm	树高 Hight/m	林龄 Age/a	密度 Density/ (tree/hm ²)	郁闭度 Crown density	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	有机质 Organic/ (mg/g)	全氮 Total nitrogen/ (mg/g)	pH
14.92(1.21)	12.55(1.03)	21	1600	0.9	1.5(0.11)	13.18(0.51)	1.27(0.03)	4.00(0.03)

括号内为标准误差。Values in parentheses are standard errors

1.2.2 凋落物收集的方法

在每个施氮水平的重复样方内随机设置2个3m×4m、离地面高度50cm的凋落物收集器,共2×12=24个。每月底收集落在收集器上的凋落物,称重,并取样带回实验室,分成落叶、落枝、落果及杂物等组分。在80℃恒温条件下烘干48小时至恒重。收集时间从2011年10月至2012年10月。不同施氮水平樟树林凋落物的年凋落量见表2。

表2 樟树林不同氮处理凋落物的组成

Table 2 Litter composition in *Cinnamomum camphora* plantation under different nitrogen treatments($\text{t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)

处理	CK	LN	MN	HN
枝凋落量 Branches production	1.09±0.14	0.99±0.18	0.70±0.20	0.85±0.13
叶凋落量 Leaf production	2.91±0.22	2.49±0.17	2.25±0.19	2.99±0.12
果凋落量 Fruit production	0.08±0.04	0.09±0.02	0.07±0.01	0.23±0.02
杂物凋落量 Debris production	0.45±0.07	0.38±0.09	0.54±0.10	0.39±0.08
总计 Total	4.53±0.32	3.95±0.28	3.56±0.41	4.46±0.48

1.2.3 凋落物养分含量的测定方法

将经过烘干处理后的新鲜凋落物样品按枝、叶、果标记后,进行粉碎过筛,用浓硫酸-重铬酸钾法测定全C含量、凯氏定氮法测定全N含量、火焰光度计测定K元素含量、原子吸收仪测定Ca和Mg营养元素含量并计算凋落物的养分年归还量。

1.2.4 数据分析

利用Excel 2003和SPSS 18.0统计软件对结果进行分析,采用单因素方差分析方法(One-Way ANOVA)比较不同施氮处理下调落物养分含量及归还量的差异显著性,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 凋落物各组分元素年平均含量

樟树凋落物各组分中,元素含量最高的是C,含量最低的是Mg(见表3),但不同施氮水平处理下(CK、LN、MN、HN),各元素含量不尽相同。

凋落枝中,自然状态下的C元素含量为 $534.68\pm 43.80\text{g/kg}$,低、中、高施氮处理下调落枝的C元素含量为 539.65 ± 50.40 、 495.64 ± 76.54 、 $510.16\pm 65.20\text{g/kg}$,未施氮处理的凋落枝的C元素含量比中、高氮处理下分别高7.3%、4.58%,说明中、高氮处理会对樟树凋落枝的C元素含量产生轻微的抑制作用。凋落枝在自然状态下的N元素含量为 $8.92\pm 2.47\text{g/kg}$,低、中、高施氮处理下调落枝的N元素含量为 14.34 ± 3.11 、 12.57 ± 2.86 、

13.21±3.55g/kg,施氮处理下(LN、MN、HN)凋落枝氮含量分别比对照组高 60.76%、40.92%、48.09%,且未施氮处理与施氮处理间差异显著($P<0.05$),说明施氮处理会对樟树凋落枝的氮含量产生明显的促进作用。在凋落枝中,K 元素含量的大小顺序为 MN>CK>HN>LN,MN 处理对凋落枝中 K 元素的含量产生增加作用,LN、HN 处理表现出一定的抑制作用。Ca 元素含量的大小顺序为 MN>HN>LN≈CK,经过 MN、HN 处理,凋落枝中 Ca 元素的含量分别增加了 28.83%、27.14%,LN 处理对 Ca 元素含量却没有表现出明显的促进作用。Mg 元素在施氮处理下的含量均小于未施氮处理,且差异显著($P<0.05$),说明施氮处理对凋落枝 Mg 元素的含量有明显的抑制作用。

表 3 樟树林不同氮处理凋落物各组分元素养分含量

元素 Elements	处理水平 Treatments	枝 Branches	叶 Foliage	果 Fruits
C	CK	534.68±43.80	536.09±69.30	492.54±60.34
	LN	539.65±50.40	560.96±53.56	514.44±58.89
	MN	495.64±76.54	557.96±88.16	458.57±73.21
	HN	510.16±65.20	487.14±86.25	459.13±62.39
N	CK	8.92±2.47	12.88±1.92	7.34±2.03
	LN	14.34±3.11	17.30±3.38	10.67±1.78
	MN	12.57±2.86	17.33±3.12	7.71±1.32
	HN	13.21±3.55	11.93±2.21	7.83±2.32
K	CK	4.24±0.78	2.83±0.96	10.30±1.26
	LN	3.04±0.69	3.54±1.35	13.42±2.09
	MN	5.55±1.82	3.17±0.32	11.30±2.11
	HN	3.82±0.93	3.37±1.36	12.51±2.67
Ca	CK	7.11±1.64	9.52±2.88	3.98±1.34
	LN	7.09±1.58	8.75±1.91	4.52±1.26
	MN	9.16±2.19	8.66±1.99	3.57±0.83
	HN	9.04±2.44	8.32±1.07	4.24±0.66
Mg	CK	1.21±0.29	1.24±0.03	1.73±0.23
	LN	1.13±0.18	1.31±0.05	1.97±0.11
	MN	0.91±0.07	1.30±0.04	1.69±0.26
	HN	1.14±0.11	1.24±0.31	1.82±0.35

凋落叶中,自然状态下的 C 元素含量为 536.09±69.30g/kg,低、中、高施氮处理下调落叶的 C 元素含量为 560.96±53.56、557.96±88.16、487.14±86.25g/kg,未施氮处理的凋落叶的 C 元素含量比低、中氮处理分别低 4.64%、4.08%,而高氮处理则比对照处理低 9.13%,各处理间差异均不显著,说明低、中氮处理会对樟树凋落叶的 C 元素含量产生轻微的促进作用,而高氮处理表现出抑制作用。凋落叶在自然状态下的 N 元素含量为 12.88±1.92g/kg,低、中、高氮处理下调落叶的 N 元素含量为 17.30±3.38、17.33±3.12、11.93±2.21g/kg,低、中氮处理下调落叶 N 元素含量分别比对照组增加 34.31%、34.55%,且差异显著($P<0.05$),而高氮处理凋落叶 N 元素含量比未施氮处理低 7.38%,说明低、中氮处理会对樟树凋落叶的氮含量产生明显的促进作用,高氮处理则表现出轻微的抑制作用。在凋落叶中,K 元素含量的大小顺序为 LN>HN>MN>CK,施氮处理对凋落叶中 K 元素的含量均产生增加作用。Ca 元素含量的大小顺序为 CK>LN>MN>HN,经过施氮处理,凋落叶中 Ca 元素的含量分别降低了 8.09%、9.03%、12.61%,说明施氮处理对 Ca 元素含量有表现出明显的抑制作用。Mg 元素在低、中氮处理下的含量与未施氮处理相比,增加了 5.65%、4.84%,说明施氮处理对凋落叶 Mg 元素的含量有轻微的促进作用。

凋落果中,自然状态下的 C 元素含量为 492.54±60.34g/kg,低、中、高施氮处理下调落果的 C 元素含量为

514.44±58.89、458.57±73.21、459.13±62.39g/kg,未施氮处理的凋落果的C元素含量比中、高氮处理下分别高6.9%、7.39%,而比低氮处理低4.44%。说明中、高氮处理会对樟树凋落果的C元素含量产生轻微的抑制作用,低氮处理会对其产生轻微的促进作用。凋落果在自然状态下的N元素含量为7.34±2.03g/kg,低、中、高施氮处理下调落果的N元素含量为10.67±1.78、7.71±1.32、7.83±2.32g/kg,施氮处理下(LN、MN、HN)凋落果氮含量均比对照组高,且低氮处理与未施氮处理差异显著($P<0.05$)。说明施氮处理会对樟树凋落果的氮含量产生促进作用。在凋落果中,K元素含量的大小顺序为LN>HN>MN>CK,施氮处理对凋落果中K元素的含量产生增加作用。Ca元素含量的大小顺序为LN>HN>CK>MN,经过LN、HN处理,凋落果中Ca元素的含量分别增加了13.57%、6.53%,MN处理对Ca元素含量表现出产生轻微的抑制作用。在低、高氮处理下,Mg元素的含量大于未施氮处理,在中氮处理下,Mg元素的含量小于未施氮处理,说明低、高氮处理对凋落果Mg元素的含量有轻微的促进作用,中氮处理对其有轻微的抑制作用。

2.2 氮沉降对凋落物各组分C/N比值的影响

由图1可以看出,氮沉降使凋落物不同组分C/N比值均有所下降。

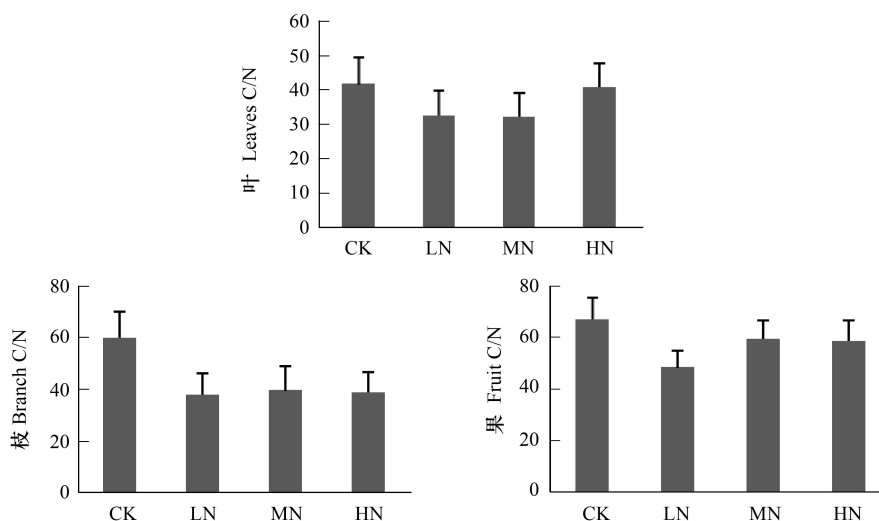


图1 氮沉降对凋落物各组分C/N的影响

Fig. 1 Effect of increased nitrogen deposition on C/N of litterfall components

CK处理下,凋落枝C/N比的平均值为59.94,经LN、MN和HN处理后,N/K比的平均值分别为37.63、39.43、38.62,比CK处理降低37.22%、34.21%和35.57%。CK与LN、MN、HN处理差异均达到显著水平($P<0.05$)。说明经过施氮处理后,凋落枝中碳含量未发生显著变化,而氮含量增加,引起凋落枝C/N比下降。

自然状态下,凋落叶C/N比的平均值为41.62,经LN、MN和HN处理后,C/N比的平均值分别为32.42、32.19、40.83,比CK处理下降22.10%、22.65%和1.90%。CK与LN、MN处理差异达到显著水平($P<0.05$)。这反应了经过不同水平氮处理后,凋落叶中氮含量显著增加,引起凋落叶C/N比下降。

CK处理下,凋落果C/N比的平均值为67.10,经LN、MN和HN处理后,N/K比的平均值分别为48.21、59.48、58.64,比CK处理降低28.15%、11.36%和12.61%。CK与LN、MN、HN处理差异均达到显著水平($P<0.05$)。

2.3 凋落物元素归还量对氮沉降的响应

土壤中碳、氮输入的重要来源是凋落物的养分归还,凋落物元素归还量是指凋落物中元素含量与凋落物量的乘积,因此,施氮处理通过改变凋落物量和凋落物中元素的含量而影响元素的归还量。

不同水平氮处理下,凋落物中元素的年归还量大小顺序为:C>N>Ca>K>Mg(见表4)。经过CK、LN、MN、HN处理,凋落物C元素的年归还量分别为218.22±39.38、197.74±37.23、163.44±36.32、199.57±38.53 g m⁻²

a^{-1} , 相对于 CK 处理, LN、MN、HN 处理使 C 元素的年归还量分别降低了 9.38%、25.10%、8.55%, 说明施氮处理对 C 元素的年归还量有抑制作用, 且中氮处理与未施氮处理差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 不同水平氮处理凋落物元素的年归还量

Table 4 Annual elements flux in litterfall under different nitrogen treatments ($\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

处理 Treatment	C 元素归还量 C flux	N 元素归还量 N flux	K 元素归还量 K flux	Ca 元素归还量 Ca flux	Mg 元素归还量 Mg flux
CK	218.22±39.38	4.78±1.15	1.36±0.42	3.57±0.66	0.50±0.08
LN	197.74±37.23	5.83±1.34	1.30±0.43	2.92±0.73	0.45±0.11
MN	163.44±36.32	4.83±1.50	1.18±0.41	2.62±0.73	0.36±0.10
HN	199.57±38.53	4.87±1.37	1.62±0.40	3.35±0.67	0.51±0.09

N 元素的年归还量分别为 4.78 ± 1.15 、 5.83 ± 1.34 、 4.83 ± 1.50 、 $4.87 \pm 1.37 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 经过 LN、MN、HN 处理后, N 元素的年归还量比 CK 处理下高出 21.97%、1.05%、1.88%, 说明施氮处理对 N 元素的年归还量均有促进作用, 且低氮处理与未施氮处理差异显著 ($P < 0.05$)。K 元素的年归还量为 1.36 ± 0.42 、 1.30 ± 0.43 、 1.18 ± 0.41 、 $1.62 \pm 0.40 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, HN 处理增加了 K 元素的归还量, LN、MN 处理减少了 K 元素的归还量; Ca 元素的年归还量为 3.57 ± 0.66 、 2.92 ± 0.73 、 2.62 ± 0.73 、 $3.35 \pm 0.67 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$; Mg 元素的年归还量为 0.50 ± 0.08 、 0.45 ± 0.11 、 0.36 ± 0.10 、 $0.51 \pm 0.09 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。经过 LN、MN、HN 处理, Ca、Mg 元素的年归还量均小于 CK 处理 (除 HN 处理下的 Mg 元素), 说明施氮处理对凋落叶中 Ca、Mg 元素的年归还量产生抑制作用。

2.3.1 凋落枝元素年归还量

在各施氮水平下 (CK、LN、MN、HN), 凋落枝中 C 元素的年归还量分别为 58.28 ± 11.26 、 53.43 ± 10.53 、 34.69 ± 9.68 、 $43.36 \pm 10.81 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ (见图 2), 经过 LN、MN、HN 处理, C 元素的年归还量比 CK 处理减少了 8.32%、40.48%、25.60%, 施氮处理对凋落枝中 C 元素的归还量有抑制作用, 中、高氮处理与未施氮处理差异显著 ($P < 0.05$), 说明中、高氮处理对凋落枝中 C 元素归还量的抑制作用明显。

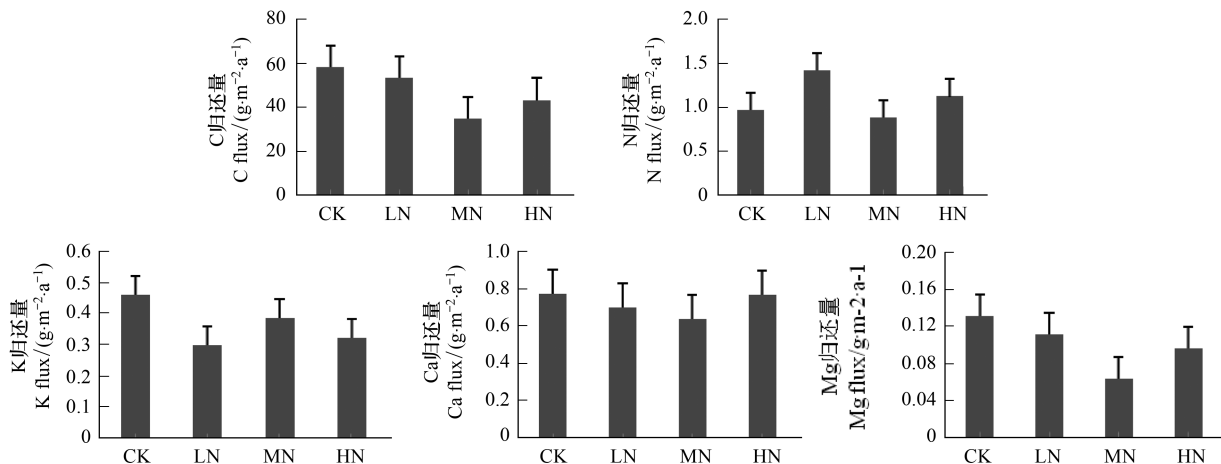


图 2 凋落枝 C、N、K、Ca、Mg 元素年归还量对氮沉降的响应

Fig. 2 Response of annual C、N、K、Ca and Mg fluxes in litter branches to nitrogen deposition

不同处理 N 元素的年归还量分别为 (0.97 ± 0.23) 、 (1.42 ± 0.30) 、 (0.88 ± 0.28) 、 $(1.12 \pm 0.26) \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 经过 LN、HN 处理, N 元素的年归还量比 CK 处理增加了 31.69%、15.46%, 且差异显著 ($P < 0.05$), 而 MN 处理 N 元素的年归还量比 CK 处理减少了 9.28%, 差异不显著, 说明 LN、HN 处理对 N 元素的年归还量有明显的促进作用, 而 MN 处理表现出轻微的抑制作用。

各施氮水平处理, K 元素的年归还量为 (0.46 ± 0.09) 、 (0.30 ± 0.07) 、 (0.39 ± 0.08) 、 $(0.32 \pm 0.10) \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$; Ca 元素的年归还量为 0.77 ± 0.15 、 0.70 ± 0.18 、 0.64 ± 0.20 、 $0.76 \pm 0.19 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$; Mg 元素的年归还量为 (0.13 ± 0.08) 、 (0.10 ± 0.07) 、 (0.08 ± 0.06) 、 $(0.11 \pm 0.05) \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

02)、 (0.11 ± 0.03) 、 (0.06 ± 0.03) 、 $(0.10 \pm 0.02) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。经过 LN、MN、HN 处理, K、Ca、Mg 元素的年归还量均小于 CK 处理, 说明施氮处理对凋落枝中 K、Ca、Mg 元素的年归还量产生抑制作用。

2.3.2 凋落叶元素年归还量

在各施氮水平下(CK、LN、MN、HN), 凋落叶中 C 元素的年归还量分别为 (156.00 ± 26.33) 、 (139.68 ± 24.69) 、 (125.54 ± 24.31) 、 $(145.65 \pm 25.57) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (见图 3), 经过 LN、MN、HN 处理, C 元素的年归还量比 CK 处理减少了 10.46%、19.53%、6.63%, 各处理间差异没有达到显著水平, 说明施氮处理对凋落叶中 C 元素的归还量有抑制作用。

不同处理 N 元素的年归还量分别为 3.75 ± 0.90 、 4.31 ± 1.01 、 3.90 ± 1.02 、 $3.57 \pm 0.08 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 经过 LN、MN 处理, N 元素的年归还量比 CK 处理增加了 14.93%、4.00%, 而 HN 处理 N 元素的年归还量比 CK 处理减少了 4.8%, 差异不显著, 说明 LN、MN 处理对 N 元素的年归还量有促进作用, 而 HN 处理表现出轻微的抑制作用。

各施氮水平处理, K 元素的年归还量为 0.82 ± 0.29 、 0.88 ± 0.31 、 0.71 ± 0.30 、 $1.01 \pm 0.26 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, LN、HN 处理增加了 K 元素的归还量, MN 处理减少了 K 元素的归还量; Ca 元素的年归还量为 2.77 ± 0.48 、 2.18 ± 0.53 、 1.95 ± 0.51 、 $2.49 \pm 0.46 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; Mg 元素的年归还量为 0.36 ± 0.05 、 0.32 ± 0.07 、 0.29 ± 0.06 、 $0.37 \pm 0.07 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。经过 LN、MN、HN 处理, Ca、Mg 元素的年归还量均小于 CK 处理(除 HN 处理下的 Mg 元素), 说明施氮处理对凋落叶中 Ca、Mg 元素的年归还量产生抑制作用。

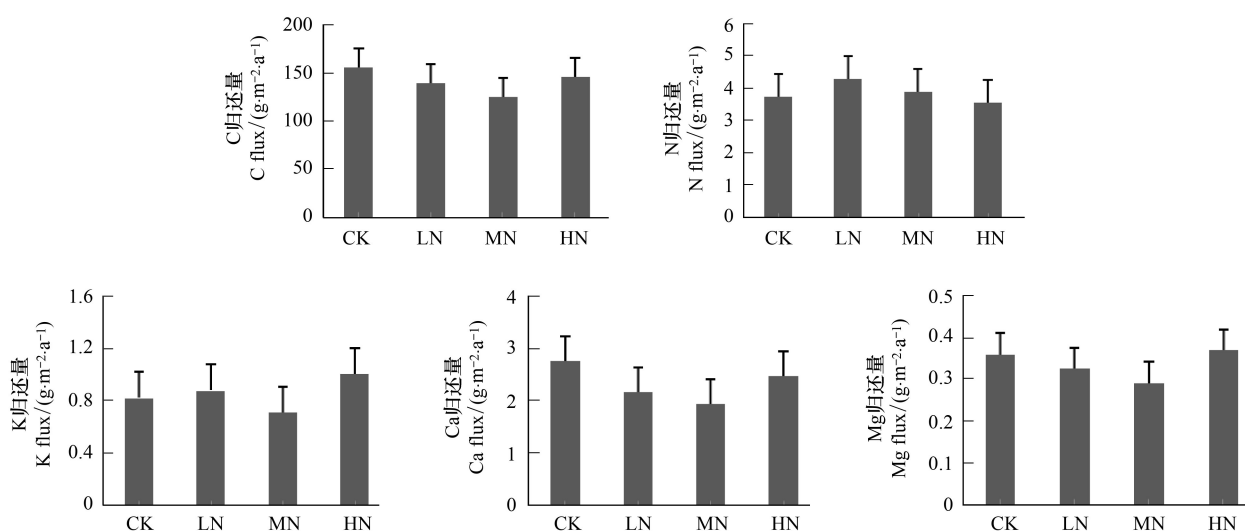


图 3 凋落叶 C、N、K、Ca、Mg 元素年归还量对氮沉降的响应

Fig. 3 Response of annual C、N、K、Ca and Mg fluxes in litter foliage to nitrogen deposition

2.3.3 凋落果元素年归还量

在各施氮水平下(CK、LN、MN、HN), 凋落果中 C、N、K、Ca、Mg 元素的年归还量的大小顺序均为 HN>LN>CK>MN(见图 4), 且在 HN 处理下, 元素归还量差异显著($P<0.05$), 说明低、高氮对凋落果中 C、N、K、Ca、Mg 元素的年归还量有促进作用, 且在高氮处理下所产生的促进作用较明显。中氮处理对元素的年归还量表现出轻微的抑制作用。

3 讨论

经过一年模拟氮沉降的实验, 樟树人工林的年凋落量分别为 4.53 ± 0.32 、 3.95 ± 0.28 、 3.56 ± 0.41 、 $4.46 \pm 0.48 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 可见施氮处理对凋落量表现出一定的抑制作用, 这与莫江明等对鼎湖山常绿阔叶林的研究结果一致^[23]。樊后保等对福建杉木人工林的研究表明, 高氮显著增加了森林凋落量, 低、中氮表现出一定的抑制作用。他认为氮沉降率的增加在一定时间内会提高植物生产力, 常见的例子就是林业经营上通过施加氮肥来促

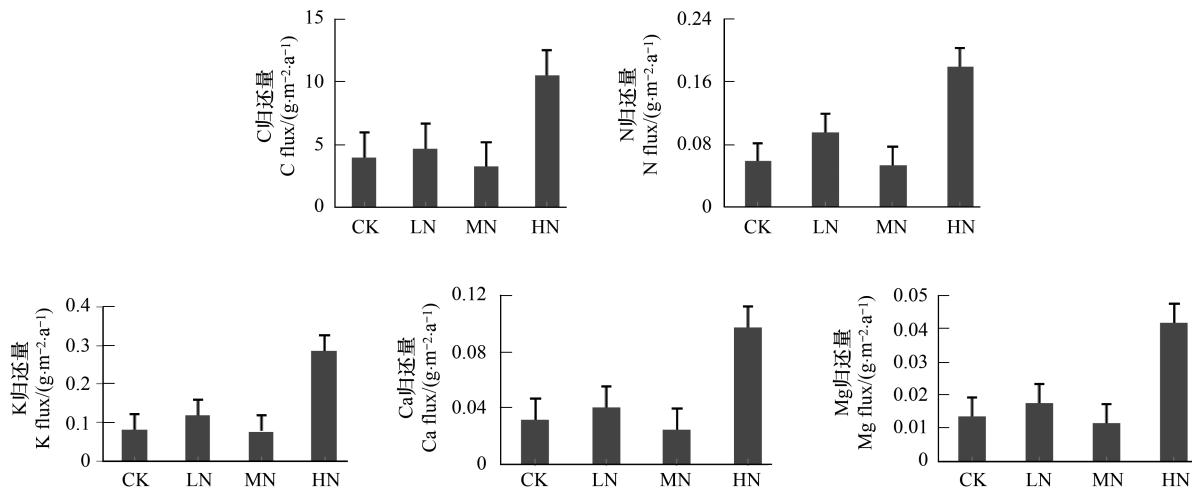


图 4 凋落果 C、N、K、Ca、Mg 元素年归还量对氮沉降的响应

Fig. 4 Response of annual C、N、K、Ca and Mg fluxes in litter fruit to nitrogen deposition

进林木生长^[22]。但研究发现,氮输入生态系统的量有一临界值 $25\text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,超出该临界值便会对植物的生产力产生不利影响(Aber et al, 1998)。本研究地的氮沉降量为 $29\text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[25],已经超过氮饱和的临界值,施氮处理会使森林生态系统达到过氮饱和的状态,超出植物以及微生物对氮元素的需求量,因此模拟氮沉降会降低生态系统的生产力,抑制森林的生长。

施氮处理后凋落物的养分含量大小顺序为: $\text{C} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$,这与刘文飞等^[15]对杉木人工林的研究结果相似 $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 。模拟氮沉降后,碳含量没有显著变化,但相对于 CK 处理, LN、MN、HN 处理后凋落物的氮含量都有所增加,这与以往的研究结论相同^[20],说明凋落物各组分氮含量对氮沉降的初期响应较敏感^[20]。实验期间,樟树人工林对氮元素的吸收率随着时间的推移逐渐降低,可能是由于在实验初期,施加氮肥满足了樟树林对氮元素的需求,吸收率也会相应的增加,当施加的氮肥达到樟树林所需氮元素的临界值时,吸收率会逐渐下降,此时,如果继续施加氮肥,将会抑制樟树林对氮元素的吸收。

从总体来看,施氮处理增加了凋落物 K、Ca、Mg 元素的含量,但变化趋势不太明显。刘文飞等^[15]对福建杉木林凋落物养分含量为期 3 年的研究表明,低氮处理对凋落物 K、Ca、Mg 元素的含量有促进作用,中、高氮处理对其有抑制作用。他认为可能是因为过量氮沉降造成土壤中多余的氮以 NO_3^- 的形式从土壤中淋失,作为 NO_3^- 的电荷平衡离子 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也从土壤中淋失,引起土壤库盐基离子量减少^[19]。大量研究表明:随着氮输入的增加,在氮饱和的早期阶段,枝、叶和细根中氮的有效性增加,从而促进氮元素的吸收,然而在氮饱和和后期阶段,氮的有效性过高导致多余的氮以 NO_3^- 的形式从土壤中淋失^[15]。本实验研究时间仅为 1 年,可能仍处于氮饱和的早期阶段,所以施氮处理使得凋落物 K、Ca、Mg 元素的含量有所增加。

樟树凋落物各组分 C/N 比经施氮处理(LN、MN、HN)后均有所下降,凋落枝、凋落叶、凋落果的 C/N 比的平均值比 CK 处理分别下降了 37.22%、34.21% 和 35.57%, 22.10%、22.65% 和 1.90%, 28.15%、11.36% 和 12.61%,说明施氮使得凋落物中氮含量显著增加,从而引起凋落物 C/N 比下降。Melin^[26] 1930 年发表了“北美几种森林凋落物的生物分解”一文,使用了 C/N 比来分析落叶的分解特征^[27], C/N 比值后来成为评价落叶分解的经典指标(王希华, 2004; Sariyildiz et al., 2003)。有许多研究证实,凋落物 C/N 比与凋落物的分解速率呈线性关系^[28]。樊后保等^[28]认为,一般情况下, C/N 比越低分解越快,但过量的氮沉降会使微生物降解中 C 的限制加剧,从而会降低凋落物的分解速率(Micks et al., 2004)。

凋落物是森林生态系统的一个重要的碳贮库,其变化动态将会对全球碳平衡产生重大影响。本研究中,凋落物中元素的年归还量大小顺序均表现为: $\text{C} > \text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$,这与刘文飞等^[15]对杉木人工林的研究结果相似 $\text{N} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 。施氮处理降低了凋落物的 C 归还量,是因为施氮处理后凋落物的碳含量没有显著变化,但

施氮使凋落物总量受到抑制,同时也抑制了凋落物的 C 归还量,因此氮沉降对森林生态系统的碳贮库有一定的抑制作用。也有研究指出,氮素对生态系统的刺激作用会减少生态系统生产力和碳贮量(Schulze, 1989; Cao et al, 1998)。从总体来看,施氮处理增加了凋落物的 N 归还量,这与凋落物养分含量所表现的规律基本一致,说明凋落物养分含量是决定凋落物元素归还量的重要因素^[15]。国内外大量研究也指出,氮沉降可以使植物,尤其叶片中氮含量显著增加^[15]。本研究发现,氮沉降不利于凋落物枝、叶中 K、Ca、Mg 元素归还量的提高,Aber(1998)认为,氮输入生态系统的量有一临界值,适度的氮沉降会增加森林的生产力,如果超出这一临界值,就会表现出抑制作用。

参考文献(References):

- [1] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750.
- [2] 莫江明, 薛花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [3] 方运霆, 莫江明, Gunderse P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [4] 王晖, 莫江明, 薛璟花, 方运霆, 李炯. 氮沉降增加对森林凋落物分解酶活性的影响. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(6): 539-546.
- [5] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C N, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [6] 谢迎新, 张淑利, 冯伟, 赵旭, 郭天财. 大气氮素沉降研究进展. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 897-904.
- [7] Townsend A R, Braswell B H, Holland E A, Penner J E. Spatial and temporal patterns in terrestrial carbon storage due to deposition of fossil fuel nitrogen. *Ecological Applications*, 1996, 6(3): 806-814.
- [8] 李明月, 王健, 王振兴, 吴晓燕, 黄儒珠, 朱锦懋. 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性生物量与 C、N、P 分配格局. *生态学报*, 2013, 33(5): 1569-1577.
- [9] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, Seitzinger S P, Howarth R W, Cowling E B, Cosby B J. The nitrogen cascade. *BioScience*, 2003, 53: 341-356.
- [10] 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Gunderson P. 氮沉降对森林植物的影响. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [11] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制. *植物生理与分子生物学报*, 2006, 32(4): 395-402.
- [12] 傅声雷, 张炜, 戴慧堂, 万师强, 李培学, 王明蕊, 戴克元, 朱师丹, 闫俊华, 王克亚, 申卫军, 林永标, 旷远文, 刘占锋, 王法明, 叶清, 赵平. 一种林冠模拟氮沉降和降雨野外控制实验系统: 中国, CN201320100383.0. 2013-08-28.
- [13] 鲁显楷, 莫江明, 李德军, 张 炜, 方运霆. 鼎湖山主要林下层植物光合生理特性对模拟氮沉降的响应. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6): 1-9.
- [14] 孙元, 邵红涛, 薛春梅, 王贵强. 氮沉降对我国森林生态系统生物多样性的影响研究进展. *黑龙江大学工程学报*, 2013, 4(2): 33-37.
- [15] 刘文飞, 樊后保, 袁颖红, 黄荣珍, 廖迎春, 李燕燕, 沈芳芳. 氮沉降对杉木人工林凋落物大量元素归还量的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 137-141.
- [16] Passarinho J A P, Lamosa P, Baeta J P, Santos H, Candido P P. Annual changes in the concentration of minerals and organic compounds of *Quercus suber* leaves. *Physiologia Plantarum*, 2006, 127(1): 100-110.
- [17] Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition. *Oecologia*, 2003, 137(4): 578-586.
- [18] Fife D N, Nambiar E K S, Saur E. Retrslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree Physiology*, 2008, 28(2): 187-196.
- [19] 刘文飞, 樊后保, 张子文, 杨跃霖, 王启其, 徐 雷. 杉木人工林针叶养分含量对模拟氮沉降增加的响应. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(3): 319-323.
- [20] 樊后保, 黄玉梓, 裴秀群, 王强, 陈秋凤, 刘文飞, 徐雷. 模拟氮沉降对杉木人工林凋落物氮素含量及归还量的影响. *江西农业大学学报*, 2007, 29(1): 43-47.
- [21] 刘文飞, 樊后保, 袁颖红, 沈芳芳, 黄荣珍, 李燕燕, 廖迎春. 杉木人工林凋落物量动态对氮沉降增加的响应. *中山大学学报*, 2011, 50(4): 106-120.
- [22] 樊后保, 刘文飞, 裴秀群, 徐雷, 王强, 陈秋凤. 杉木人工林凋落物量对氮沉降增加的初期响应. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1335-1338.
- [23] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [24] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [25] Du C Y, Zeng G W, Zhang G, Tang L, Li X D, Huang L, Jiang Y W. Input-Output budgets for inorganic nitrogen under acid rain in a subtropical evergreen mixed forest in central-south China. *Water, Air Soil Pollution*, 2008, 190(1): 171-181.
- [26] Melin E. Biological decomposition of some types of litter from North American forests. *Ecology*, 1930, 11(1): 72-101.
- [27] 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.
- [28] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 张子文, 曹汉洋, 徐雷. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 8-13.