

北京东灵山地区常见灌丛生长及凋落物生产对氮添加的响应

张建华^{1,2*} 唐志尧³ 沈海花² 方精云^{2,3}

¹忻州师范学院, 山西忻州 034000; ²中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ³北京大学城市与环境学院, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

摘要 我国北方灌丛土壤瘠薄, 近几十年来的氮沉降显著提高了北方灌丛土壤的可利用氮水平。灌木生长是灌丛碳吸存的重要组成部分, 凋落物在土壤和植物间充当着至关重要的纽带作用, 是陆地生态系统养分与能量循环的关键, 灌丛生长和凋落物生产受氮添加的影响很大。然而, 大气氮沉降对灌丛碳吸存和凋落物生产的影响人们知之甚少。该研究以荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)灌丛为例, 通过0 (N₀)、20 (N₁)、50 (N₂)、100 (N₃) kg N·hm⁻²·a⁻¹施氮实验, 研究了短期(2012–2013年)氮添加对东灵山地区典型灌丛生长及凋落物生成的影响。研究结果显示: 在4种氮添加处理中, 荆条灌丛灌木基径年增长率分别为1.69%、2.78%、2.51%和1.80%, 相应处理中, 绣线菊灌丛灌木基径年增长率分别为1.38%、1.37%、1.59%和2.05%; 与之对应的株高年增长率分别为8.36%、8.48%、9.49%和9.83% (荆条灌丛)和2.12%、2.86%、2.36%、2.52% (绣线菊灌丛)。虽然处理之间的差异没有达到显著性水平, 但N沉降在一定程度上促进了灌木的生长。不同处理间, 荆条地上生物量增加了0.19、0.23、0.14、0.15 t C·hm⁻²·a⁻¹, 绣线菊灌丛地上生物量增加了0.027、0.025、0.032、0.041 t C·hm⁻²·a⁻¹。在自然条件下, 荆条和绣线菊灌丛2013年凋落物的年产量分别为135.7和129.6 g·m⁻²。短期氮沉降对凋落物及组分的年产量有一定的促进作用, 但处理之间的差异没有达到显著性水平。研究结果表明施肥时间短、土壤含水量低等因素导致土壤可利用氮的利用效率很低, 从而使灌丛对施肥的响应比较缓慢。

关键词 氮沉降; 碳循环; 温带灌丛; 生长率; 凋落物; 季节动态

引用格式: 张建华, 唐志尧, 沈海花, 方精云 (2017). 北京东灵山地区常见灌丛生长及凋落物生产对氮添加的响应. 植物生态学报, 41, 71–80. doi: 10.17521/cjpe.2016.0093

Responses of growth and litterfall production to nitrogen addition treatments from common shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China

ZHANG Jian-Hua^{1,2*}, TANG Zhi-Yao³, SHEN Hai-Hua², and FANG Jing-Yun^{2,3}

¹Xinzhou Normal University, Xinzhou, Shanxi 034000, China; ²State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and ³College of Urban and Environmental Sciences, and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract

Aims The shrublands of northern China have poor soil and nitrogen (N) deposition has greatly increased the local soil available N for decades. Shrub growth is one of important components of C sequestration in shrublands and litterfall acts as a vital link between plants and soil. Both are key factors in nutrient and energy cycling of terrestrial ecosystems, which greatly affected by nitrogen (N) addition (adding N fertilizer to the surface soil directly). However, the effects and significance of N addition on C sequestration and litterfall in shrublands remain unclear. Thus, a study was designed to investigate how N deposition and related treatments affected shrublands growth related to C sequestration and litterfall production of *Vitex negundo* var. *heterophylla* and *Spiraea salicifolia* in Mt. Dongling region of China.

Methods A N enrichment experiment has been conducted for *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* shrublands in Mt. Dongling, Beijing, including four N addition treatment levels (control (N₀, 0 kg N·hm⁻²·a⁻¹), low N (N₁, 20 kg N·hm⁻²·a⁻¹), medium N (N₂, 50 kg N·hm⁻²·a⁻¹) and high N (N₃, 100 kg N·hm⁻²·a⁻¹)). Basal diameter and plant height of shrub were measured from 2012–2013 within all treatments, and allometric models for different species of shrub's live branch, leaf and root biomass were developed based on independent variables of

收稿日期Received: 2016-03-11 接受日期Accepted: 2016-09-21
* E-mail: 1042584932@qq.com; wj123-2007@163.com

basal diameter and plant height, which will be used to calculate biomass increment of shrub layer. Litterfall (litterfall sometimes is named litter, referring to the collective name for all organic matter produced by the above-ground part of plants and returned to the surface, and mainly includes leaves, bark, dead twigs, flowers and fruits.) also was investigated from 2012–2013 within all treatments.

Important findings The results showed 1) mean basal diameter of shrubs in the *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* shrublands were increased by 1.69%, 2.78%, 2.51%, 1.80% and 1.38%, 1.37%, 1.59%, 2.05% every year; 2) The height growth rate (the shrub height relative growth rate is defined with the percentage increase of plant height) of shrubs in the *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* shrublands were 8.36%, 8.48%, 9.49%, 9.83% and 2.12%, 2.86%, 2.36%, 2.52% every year, respectively. These results indicated that N deposition stimulated growth of shrub layer both in *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* shrublands, but did not reach statistical significance among all nitrogen treatments. The above-ground biomass increment of shrub layer in the *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* shrublands were 0.19, 0.23, 0.14, 0.15 and 0.027, 0.025, 0.032, 0.041 t C·hm⁻²·a⁻¹ respectively, which demonstrated that short-term N addition had no significant effects on the accumulation of C storage of the two shrublands. The litter production of the *V. negundo* var. *heterophylla* and *S. salicifolia* communities in 2013 were 135.7 and 129.6 g·m⁻² under natural conditions, respectively. Nitrogen addition promoted annual production of total litterfall and different components of litterfall to a certain extent, but did not reach statistical significance among all nitrogen treatments. Above results indicated that short-term fertilization, together with extremely low soil moisture content and other related factors, lead to inefficient use of soil available nitrogen and slow response of shrublands to N addition treatments.

Key words nitrogen deposition; carbon cycle; temperate shrublands; growth rate; litterfall; seasonal dynamics

Citation: Zhang JH, Tang ZY, Shen HH, Fang JY (2017). Responses of growth and litterfall production to nitrogen addition treatments from common shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 71–80. doi: 10.17521/cjpe.2016.0093

过去几十年来, 人类活动所引起的大气氮(N)沉降增加显著改变了全球N循环(Vitousek *et al.*, 1997; Mo *et al.*, 2004), 这种情况在未来数十年将进一步加剧(Galloway *et al.*, 2004)。持续增加的N沉降导致了一系列生态问题, 如土壤酸化、土壤营养元素储存失衡和水体富营养化等(Howard & Richard, 2003; Galloway *et al.*, 2004), N沉降及其生态后果已成为全球变化研究的热点内容。

灌丛是陆地生态系统的重要组成部分, 在群落演替过程中扮演着极其重要的角色, 在环境保护和替代能源方面都有非常重要的作用(胡会峰等, 2006)。灌丛生物量较低, 因而很少受到重视, 一般而言, 灌丛生态系统碳密度只占森林的10%–30%(Lieth & Whittaker, 1975; 贺金生等, 1997; 郑绍伟和唐敏, 2007)。同时, 灌丛处于比较贫瘠的土壤, 通常为N限制生态系统, 生态系统脆弱, 更易受环境变化的影响(Gorissen *et al.*, 2004; Wessel *et al.*, 2004)。在全球气候变化背景下, 尤其是大气N沉降显著增加的情况下, 灌丛碳循环一旦发生变化, 就会对全球气候变化产生深刻的影响。目前, 大气N沉降对灌丛生态系统影响的研究还十分缺乏, 灌丛

生态系统对N沉降的响应方式还不清楚。

为此, 我们选择北京东灵山的典型灌丛——荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)灌丛为研究对象, 通过施氮的方式模拟N沉降增加情景, 探讨该灌丛类型生长及凋落物生产对N沉降的初期响应规律, 以期揭示灌丛生态系统对全球变化响应机制研究积累数据。

1 材料和方法

1.1 研究地点

东灵山(39.80°–40.03° N, 115.40°–115.60° E)位于北京市门头沟区西部, 地理上属太行山系, 小五台山东部余脉, 主峰海拔2 303 m。该区属暖温带半湿润性季风气候, 年平均气温6.3 °C; 年降水量612 mm。植被类型以暖温带落叶阔叶林为主。从低山丘陵到山顶, 该山的植被垂直带依次划分为: 在400–1 100 m的低山丘陵地区, 主要以荆条、绣线菊等灌丛为主; 在海拔1 100–1 700 m, 是由油松(*Pinus tabulaeformis*)林、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林、辽东栎(*Quercus mongolica*)林、核桃楸(*Juglans mandshurica*)林和落叶阔叶混交林组成

的典型森林植被; 在海拔1 700–2 300 m, 主要是由蒿草(*Kobresia* spp.)、细叶薹草(*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*)和多种亚高山成分的杂类草组成的亚高山草甸(刘贤赵等, 2009)。研究区背景N沉降为15 kg N·hm⁻²·a⁻¹ (Du *et al.*, 2013), 基本未受污染。实验样地分别选取低海拔的荆条和绣线菊灌丛, 两灌丛的样地情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 试验方案

于2011年9月在物种组成、群落结构和生境相对均匀的荆条和绣线菊灌丛坡面上, 分别设置12块5 m × 5 m的试验样方, 相邻样方之间设置5–10 m的缓冲带, 每块样方中心4.5 m × 4.5 m的面积划分成9个1.5 m × 1.5 m小区, 用于观察和采样。建立试验样地后, 于2012年7月开始进行4个不同水平的模拟N沉降处理。试验设置4种处理, 分别为对照(N₀)、低氮(N₁, 相当于20 kg N·hm⁻²·a⁻¹)、中氮(N₂, 相当于50 kg N·hm⁻²·a⁻¹)和高氮(N₃, 相当于100 kg N·hm⁻²·a⁻¹), 每种处理设3个重复。所有肥料分5次在每年5月至9月每月上旬选择傍晚或降雨前进行施肥。施肥主要通过肩背式喷雾器方式进行: 施肥前将每个样地所需尿素溶于2 L清水(全年水份额外添加量折算为0.4 mm降水量), 人工在样地灌丛下来回均匀地

进行喷洒; 每次施肥时, 对照样地(N₀)喷洒等量的清水。

1.2.2 灌木层生物量的测定与生长监测

为推算灌丛群落的生物量, 在样方外选取绣线菊、荆条、山杏(*Armeniaca sibirica*)、蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)、河蒴蒹花(*Wikstroemia chamaedaphne*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、小叶白蜡(*Fraxinus bungeana*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*) 8种灌木, 对每个物种按照不同等级的基茎选取3–5株标准株(每种总株数>30)。对于地上部分由根部萌生的多根茎构成的丛生灌木, 被取样的每一丛, 按照每根茎(地上生物量)和对应的根(地下部分)呈正比来将每丛的地下总量进行较合理的分割, 从而获得丛生灌木每根茎, 即每个“克隆个体”的总生物量。

对选定的每种灌木个体, 测定其生物量和其他生长因子, 建立各器官生物量与D²H之间的相关生长式(D为基径, H为株高), 利用这些关系式和实测的灌木高度(H)和基径(D), 通过方程(1)计算得到各样地灌木层生物量, 然后按含碳量50%换算得到碳密度(方精云等, 2006)。

$$Biomass = a (D^2H)^b \tag{1}$$

式中, a、b为参数。将样地内所有基径大于5 mm的灌木挂牌, 并于2012年8月初进行了H和D的初始值

表1 实验样地地形、土壤和植被特征(平均值±标准误差, n = 3)
Table 1 Topography, soil and vegetation characteristics of the experimental sites (mean ± SE, n = 3)

项目 Item	荆条灌丛 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> shrubland	绣线菊灌丛 <i>Spiraea salicifolia</i> shrubland
地形和气候 Topography and climate		
海拔 Elevation (m)	791	1 170
坡向 Aspect	S	S
坡度 Slope (°)	28	25
年平均气温 Mean annual temperature (°C)	12.3	9.2
表层土壤特征 Topsoil property		
土壤pH Soil pH	8.7	8.9
总碳含量 Total carbon (mg·g ⁻¹)	28.88 ± 2.10	39.50 ± 5.03
总氮含量 Total nitrogen (mg·g ⁻¹)	2.72 ± 0.32	2.29 ± 0.36
总磷含量 Total phosphorous (mg·g ⁻¹)	0.47 ± 0.04	0.48 ± 0.03
无机氮含量 Inorganic nitrogen (mg·kg ⁻¹)	6.01 ± 2.38	2.51 ± 2.88
速效磷含量 Available phosphorous (mg·kg ⁻¹)	1.03 ± 0.09	1.38 ± 0.77
群落特征 Community character		
灌木高度 Shrub height (cm)	78.1 ± 12.37	79.8 ± 7.43
平均基径 Average base diameter (cm)	0.77 ± 1.77	0.56 ± 0.04
灌木密度 Shrub density (stems·hm ⁻²)	1.6 × 10 ⁵	3.6 × 10 ⁵

测量。为减少测量对群落的干扰，在首次调查后的每个样方选取包含不同径级的约60个体并在其D处(距地面5 cm) 标记，在2013年8月初对H和D进行了再次调查，两次测量结果之差就是H和D的年生长量。其中，H用钢卷尺测量，精确到1 mm，D用电子游标卡尺测量，精确到0.1 mm。

灌木相对生长速率分别用D增加的百分比($\Delta D\%$)和H增加的百分比($\Delta H\%$)来表示，单株灌木的相对生长速率：

$$\Delta D\% = (D_{t1} - D_{t0}) \times 100\% / D_{t0} \tag{2}$$

$$\Delta H\% = (H_{t1} - H_{t0}) \times 100\% / D_{t0} \tag{3}$$

D_{t1}和H_{t1}分别为t = t₁时的D和H，D_{t0}和H_{t0}分别为t = t₀时的D和H，灌丛平均生长速率为样地内所有单株茎(或植株)相对生长速率的平均值。

整个样方生物量的增加速率(ΔM)可利用标记株的生物量的年增加量($m_{t1} - m_{t0}$)和整个样方所有个体的生物量(M_{t0})建立关系推算：

$$\Delta M = (m_{t1} - m_{t0}) \times M_{t0} / m_{t0} \tag{4}$$

m_{t0}和m_{t1}分别为t = t₀，t₁是每个样方标记株的生物量， ΔM 为每个样方灌木层生物量的增量，M_{t0}为t = t₀时每个样方灌丛的生物量。

1.2.3 凋落物收集

在每个样地随机设置3个面积为0.25 m² (0.5 m × 0.5 m)的收集器。2012年7月–2013年11月，每月收集一次凋落物。将收集回来的凋落物按枝、叶、花果组分分类并装袋，置于干燥箱中65 °C烘干至恒质量后称质量。对每个样方收集框中的凋落物质量取平均值，据此换算该样方该月单位面积的凋落物产量。

1.2.4 数据处理

采用单因子方差分析比较了不同的N添加水平对生物量、生长量及凋落物年产量的影响。采用二元回归法建立了8种灌木植物形态因子指标与生物量之间的关系，对各处理的凋落物月动态进行单因素方差分析，并采用最小显著差数法(least significant difference, LSD)进行多重比较。用Excel 2003和SigmaPlot 12.0完成制图，采用SPSS 17.0软件完成统计分析。

2 结果和分析

2.1 灌木生物量异速生长模型的建立

回归分析表明，8种灌木的生物量模型均为幂函

表2 东灵山地区8种常见灌木物种生物量异速生长模型
Table 2 Biomass allometric models for eight common shrub species in Mt. Dongling

物种 Species	器官 Organ	变量 Variable	R ²	方程 Equation
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	根 Root	D ² H	0.81	y = 1.26x ^{0.77}
	枝 Branch	D ² H	0.94	y = 1.09x ^{0.79}
	叶 Leaf	D ² H	0.87	y = 1.61x ^{0.56}
小叶白蜡 <i>Fraxinus bungeana</i>	总计 Total	D ² H	0.95	y = 3.53x ^{0.74}
	根 Root	D ² H	0.88	y = 0.2x ^{0.91}
	枝 Branch	D ² H	0.50	y = 5.47x ^{0.51}
小叶鼠李 <i>Rhammus parvifolia</i>	叶 Leaf	D ² H	0.77	y = 0.13x ^{0.8}
	总计 Total	D ² H	0.72	y = 4.47x ^{0.62}
	根 Root	D ² H	0.95	y = 0.7x ^{0.85}
河朔蒺藜 <i>Wikstroemia chamedaphne</i>	枝 Branch	D ² H	0.96	y = 0.74x ^{0.91}
	叶 Leaf	D ² H	0.88	y = 0.89x ^{0.58}
	总计 Total	D ² H	0.96	y = 1.95x ^{0.85}
绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	根 Root	D ² H	0.83	y = 0.81x ^{0.61}
	枝 Branch	D ² H	0.95	y = 0.92x ^{0.78}
	叶 Leaf	D ² H	0.48	y = 1.32x ^{0.35}
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	总计 Total	D ² H	0.92	y = 2.31x ^{0.68}
	根 Root	D ² H	0.77	y = 0.18x ^{1.14}
	枝 Branch	D ² H	0.78	y = 0.23x ^{1.18}
蚂蚱腿子 <i>Myrpinos dioica</i>	叶 Leaf	D ² H	0.62	y = 0.07x ^{1.15}
	总计 Total	D ² H	0.79	y = 0.48x ^{1.16}
	根 Root	D ² H	0.84	y = 0.2x ^{1.09}
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	枝 Branch	D ² H	0.82	y = 0.54x ^{0.95}
	叶 Leaf	D ² H	0.66	y = 0.86x ^{0.59}
	总计 Total	D ² H	0.90	y = 1.07x ^{0.95}
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	根 Root	D ² H	0.95	y = 0.07x ^{1.16}
	枝 Branch	D ² H	0.91	y = 0.42x ^{1.00}
	叶 Leaf	D ² H	0.79	y = 0.31x ^{0.71}
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	总计 Total	D ² H	0.95	y = 0.64x ^{1.00}
	根 Root	D ² H	0.41	y = 0.19x ^{1.06}
	枝 Branch	D ² H	0.87	y = 0.15x ^{1.5}
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	叶 Leaf	D ² H	0.84	y = 0.29x ^{1.25}
	总计 Total	D ² H	0.84	y = 0.61x ^{1.29}

D²H为自变量，器官生物量为因变量。
D²H is regarded as independent variables and organ biomass as dependent variables.

数方程(表2)。各灌木物种基于自变量D²H的生物量模型有着较大的R²，因变量根、茎、叶、总生物量的生物量模型的R²值的分布范围是0.41 (胡枝子)至0.95 (小叶鼠李)、0.50 (小叶白蜡)至0.96 (小叶鼠李)、0.48 (河朔蒺藜)至0.88 (小叶鼠李)、0.72 (小叶白蜡)至0.96 (小叶鼠李)(所有相关关系均极为显著，p < 0.001)(表2)，绝大部分模型可以解释因变量超过80%的方差，表明8个灌木种的各组分的生物量回归模型能够满足估算的要求。

2.2 氮添加对灌木生长的影响

实验前, 各样地间的灌木的 D 和 H 无显著差异(表3), 可以用来比较不同N处理对灌木生长的影响。施肥2年后, N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3 处理的荆条灌木层 D 增长率分别为: 1.69%、2.78%、2.51%、1.80%, 相应处理中绣线菊灌木层 D 增长率为1.38%、1.37%、1.59%、2.05% (图1A); 不同处理中, 荆条灌木层 H 增长率分别为8.36%、8.48%、9.49%、9.83%, 相应处理中绣线菊灌木层 H 增长率分别为2.12%、2.86%、2.36%、2.52% (图1B)。氮添加对荆条和绣线菊样地灌木的 D 和 H 增长率均无显著的影响。

2.3 氮添加对灌木层生物量的影响

施肥2年后, 各处理中荆条灌木地上生物量(AGB)增量分别为0.19、0.23、0.14、0.15 $t \cdot C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, 相应处理中绣线菊灌木地上生物量增量分别为0.027、0.025、0.032、0.041 $t \cdot C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ (图2A);

荆条和绣线菊灌木各处理样地总生物量(TB)的增量分别为0.29、0.36、0.22、0.22 $t \cdot C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 和0.043、0.046、0.048、0.047 $t \cdot C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ (图2B)。N添加对荆条和绣线菊灌木层生物量无明显的影响。

2.4 凋落物产量对N添加的初期响应

在2012年, N_2 和 N_3 处理增加了荆条灌木凋落量; 各N处理均提高了绣线菊灌木凋落量。在2013年, 各N处理对两灌木凋落量均有促进作用, 但均未达到统计学上的显著差异(图1)。 N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3 处理的荆条和绣线菊灌木总凋落量在2012年分别为89.1、87.3、119.2、99.7和104.9、133.7、117.1、138.7 $g \cdot m^{-2}$; 2013年的产量分别为135.7、148.4、155.9、153.4和129.6、191.5、156.4、182.2 $g \cdot m^{-2}$ 。不同N处理下的两灌木凋落物年产量均表现为2013年的产量高于2012年。在凋落物的组成中, 叶占大部分, 约80%以上, 其次为花果和枝, 两者约占20% (图3)。

表3 不同氮添加处理样地灌木的基径和株高(平均值±标准偏差)

Table 3 Shrub diameter (D , cm) and height (H , cm) of shrubland under different nitrogen addition treatments (mean ± SD)

物种 Species	变量 Variable	对照 Control (N_0)	低氮 Low-N (N_1)	中氮 Medium-N (N_2)	高氮 High-N (N_3)
荆条灌木 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> shrubland	D	0.70 ± 0.10	0.90 ± 0.20	0.70 ± 0.00	0.70 ± 0.10
	H	78.30 ± 7.80	84.20 ± 10.10	74.60 ± 3.00	75.40 ± 9.00
绣线菊灌木 <i>Spiraea salicifolia</i> shrubland	D	0.53 ± 0.00	0.57 ± 0.00	0.57 ± 0.00	0.54 ± 0.00
	H	76.40 ± 0.60	78.80 ± 4.00	81.40 ± 7.10	82.80 ± 4.70

N_0 , 0 kg $N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; N_1 , 20 kg $N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; N_2 , 50 kg $N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; N_3 , 100 kg $N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$.

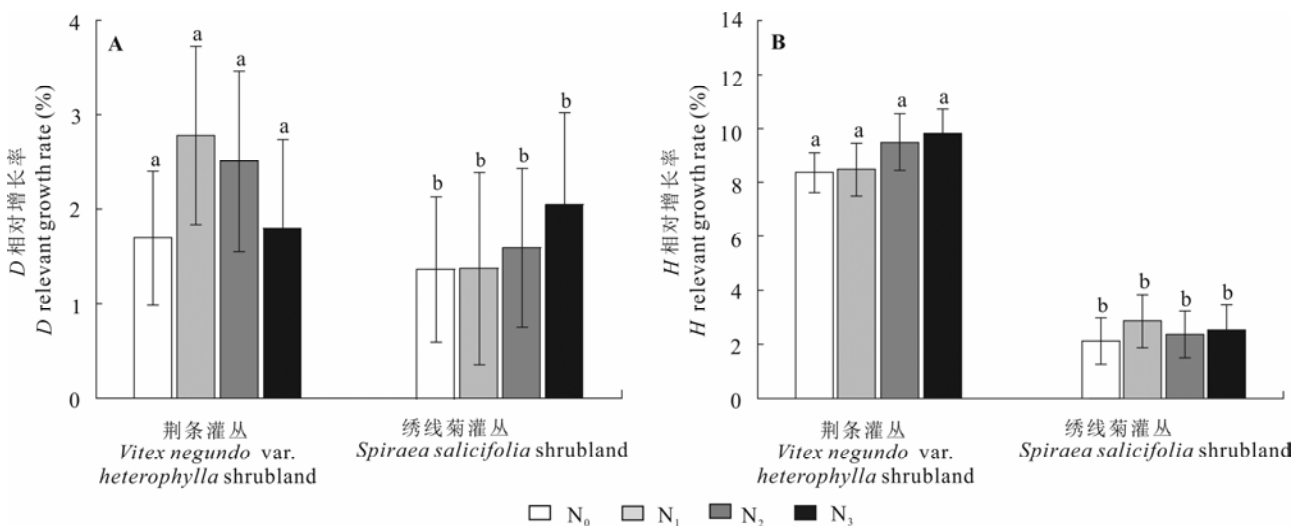


图1 氮添加对灌木基径(D)和株高(H)相对生长速率的影响(平均值±标准偏差)。相同字母a和b分别表示各处理间无显著差异($p > 0.05$)。 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 氮添加量分别为0、20、50、100 $kg \cdot N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

Fig. 1 Influence of nitrogen addition treatments on the relative growth rates of shrub diameter (D) and height (H) (mean ± SD). The same letters indicates no significant difference ($p > 0.05$) among treatments. N_0 , N_1 , N_2 and N_3 denote 0, 20, 50 and 100 $kg \cdot N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ nitrogen addition, respectively.

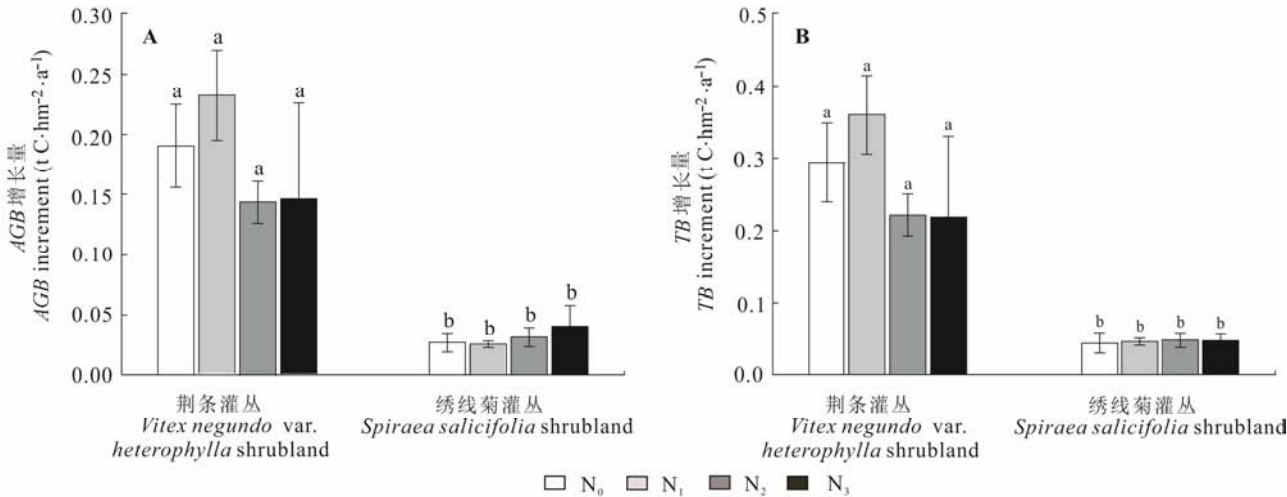


图2 氮添加对灌木层地上生物量(AGB)和总生物量(TB)的净增量的影响(平均值±标准偏差)。相同字母a和b分别表示各处理间无显著差异($p > 0.05$)。N₀、N₁、N₂、N₃同图1。

Fig. 2 Influence of nitrogen addition treatments on above ground biomass (AGB) and total biomass (TB) (mean ± SD). The same letter indicates no significant difference ($p > 0.05$) among treatments. N₀, N₁, N₂, N₃ see Fig. 1.

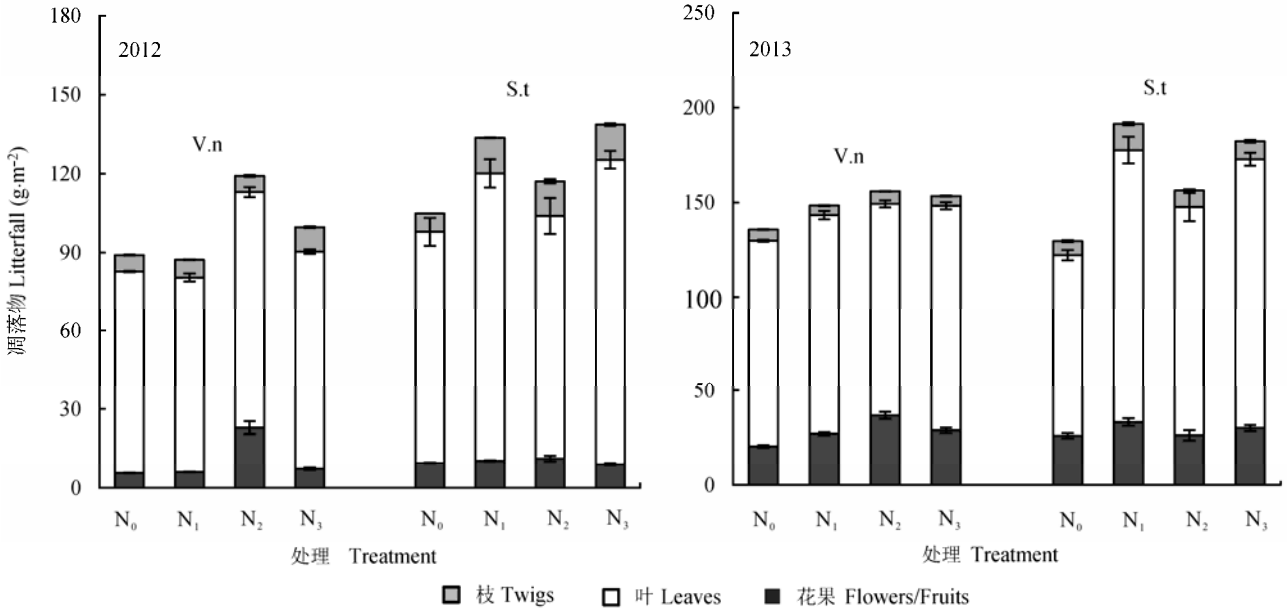


图3 实验期间2012 (左)和2013 (右)年氮添加对荆条灌丛(V.n)和绣线菊灌丛(S.t)凋落物总量及各组分量的影响(平均值±标准偏差)。N₀、N₁、N₂、N₃同图1。

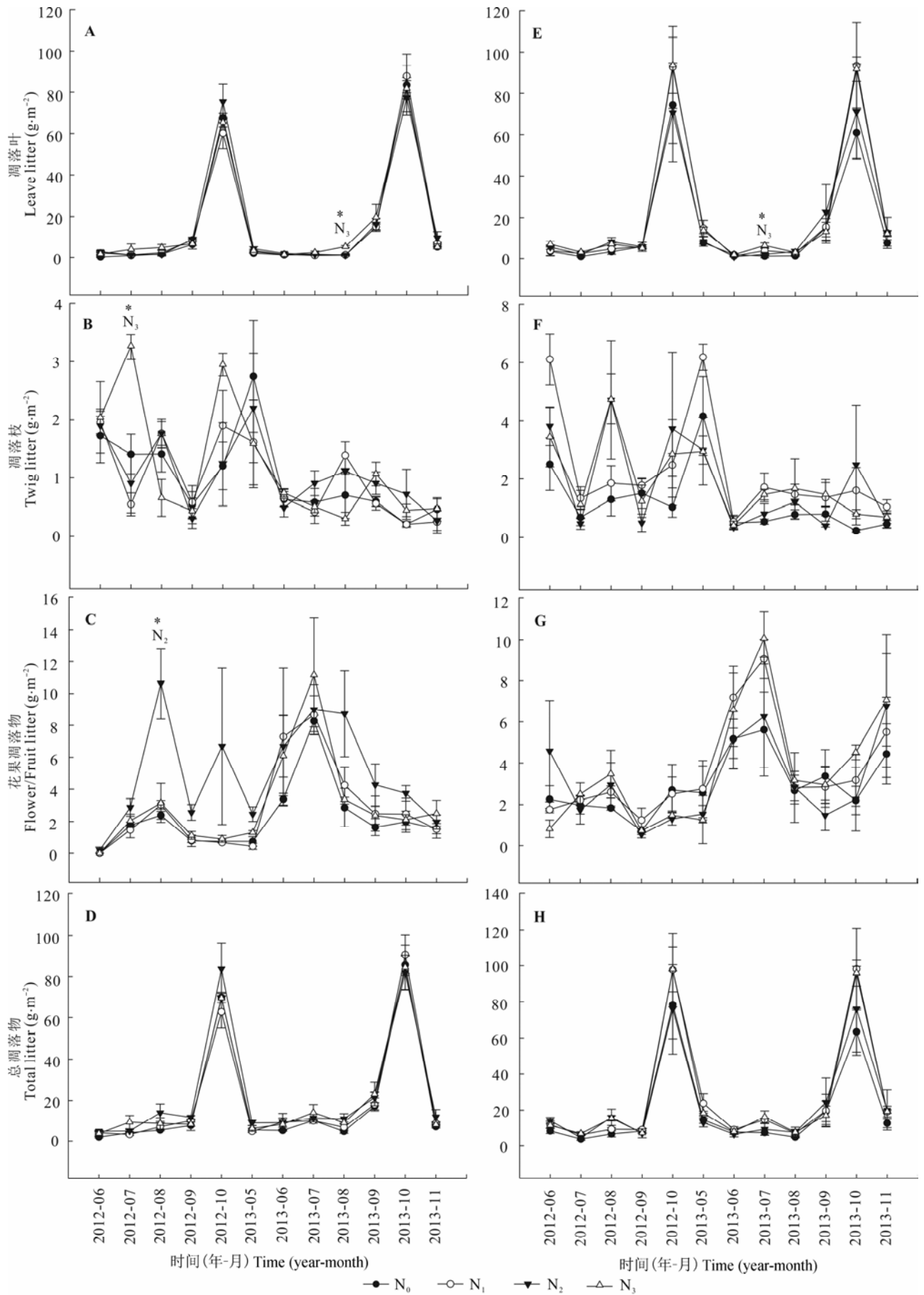
Fig. 3 Influence of nitrogen addition treatments on gross litterfall and different components of litterfall of *Vitex negundo* var. *heterophylla* (V.n) and *Spiraea salicifolia* (S.t) shrublands in 2012 (left) and 2013 (right) (mean ± SD). N₀, N₁, N₂, N₃ see Fig. 1.

对凋落物各组分的LSD检验结果表明,在2012和2013年,各N处理增加了荆条灌丛花果和落叶的产量,对凋落枝的影响结果不一致,2012的N₁、N₃

和2013年的N₂处理对凋落枝产量起促进作用,其他处理起抑制作用,处理之间差异不显著($p > 0.05$)。与之相比,在绣线菊灌丛,除了2012年的N₃处理对

图4 氮添加对凋落物总量及各组分的季节变化的影响(平均值±标准偏差)。左侧为荆条,右侧为绣线菊。带星号的N₂和N₃处理与对照N₀差异达到显著水平。N₀、N₁、N₂、N₃同图1。

Fig. 4 Influence of nitrogen addition treatments on seasonal variation of gross litterfall and its component (mean ± SD). Left for *Vitex negundo* var. *heterophylla* and right for *Spiraea salicifolia* shrublands, respectively. N₂ and N₃ marked with an asterisk have a very significant difference ($p < 0.05$) compared to the control. N₀, N₁, N₂, N₃ see Fig. 1.



花果产量起抑制作用外, 其他N处理对各组分产量均表现为促进作用, 差异也不显著($p > 0.05$)。

2.5 凋落物产量的季节动态

由图4可知, 在荆条样地, 落叶量的月动态变化特征与凋落物总量的变化趋势相吻合。总凋落物和落叶在5至10月表现为逐渐增加的趋势, 在10月达到峰值, 年际间存在波动。花果凋落量的峰值在2012年和2013年分别出现在8月和7月; 凋落枝的变化则相对复杂, 2012年波动规律不明显, 在2013年5月出现一个峰值(图4A–4D)。在绣线菊灌丛样地, 总凋落物和落叶季节动态曲线相似, 高峰期均出现在10月。花果凋落量和落枝量在2012年变化规律不明显。2013年两者的最大值分别在7月和5月(图4E–4H)。N₀、N₁、N₂和N₃处理的花果凋落量在7月的产量分别为: 5.61、9.06、6.26和10.07 g·m⁻²; 相应处理的凋落枝在同年5月的产量分别为: 4.16、6.18、2.99和2.95 g·m⁻²。重复测量方差分析表明, N₃处理显著增加了荆条灌丛叶凋落量和枝凋落量, N₂处理显著增加了荆条灌丛花果凋落量。N₃处理增加了绣线菊灌丛叶凋落量(图4)。

3 讨论

以往的研究表明, N沉降或施N处理促进了北方和温带森林的生长(Tamm, 1991; Spiecker, 1999), 尤其是在背景N沉降量较低的地区。N沉降对林木生长的影响因林分类型、N输入量及实验持续时间以及林龄不同而异(Kira & Shidei, 1967; Murty *et al.*, 1996)。与森林相比, 灌丛生态系统比较脆弱, 对环境变化更敏感, 更易受环境变化的影响(Gorissen *et al.*, 2004; Wessel *et al.*, 2004)。研究表明, 短期N添加并未对植物新鲜器官生产量产生显著影响, 对群落生产力的初期影响也有限(樊后保等, 2007; 吕妍等, 2013)。我们发现, 短期施肥通常具有促进灌木基径、株高、灌丛碳库增加的趋势, 但效果并不显著。这与前人的研究结果(樊后保等, 2007; 吕妍等, 2013)一致。此外, 图2显示, 与对照及N₁处理相比, N₃处理对荆条灌木层地上及总生物量的增加有抑制趋势, 这可能与施肥时间短、实验期间降雨较少等原因导致土壤可利用N的利用效率很低有关, 从而使施肥对灌丛的促进作用十分微弱。另一个可能的原因是, 本文主要计算的是灌丛的活生物量, 没有加上各处理样方内的年凋落物量, 而凋落物也是

灌木生长的部分。从图3可知, N添加有增加凋落物产量的趋势, 而且增加趋势较生长要明显得多, 即N添加都促进了荆条灌木层生物量的增加。我们同时发现, 短期N添加对两种灌丛凋落物量没有显著的影响(图1), 这与Smaill等(2008)、吕妍等(2013)和张驰等(2014)的研究结果一致。凋落物是植物叶片、枝条等新陈代谢的产物。施肥可通过影响植物叶片、枝条等新鲜器官的生产量或分配比例(吕妍等, 2013), 间接地影响凋落物生产量及其动态过程。N沉降在一定程度上会增加土壤有效N水平, 因而N沉降率的增加在一定时间内会促进植物生产力, 增加凋落物产量(Liu & Greaver, 2010; Lu *et al.*, 2011)。常见的例子就是林业经营上经常通过施加N肥来促进林木生长(Tamm, 1991)。土壤通过土壤的透气性、水分状况、养分状况及微生物活动等也会影响凋落物产量(Dray & Gorham, 1964; Kikuzawa *et al.*, 1977)。本研究的实验样地均在阳坡, 土壤水分蒸发严重, 此外, 在开展本实验期间, 降雨较少, 导致土壤含水量极低, 使土壤可利用N的利用效率降低, 进而影响了植物生长, 这可能是导致试验结果差异不显著的主要原因之一。

本研究还发现, 施肥2年的凋落物产量比施肥1年的有较明显的增加。这可能是因为施肥对凋落物生产的影响效应随时间的推移才能显现出来(Kozovits *et al.*, 2007), 因为灌丛对外源N输入的响应需要一个过程, 从N输入到地表, 然后被根系吸收利用, 再传输到植物叶片, 然后到被光合作用利用, 这是一个复杂而漫长的过程, 受多方面的影响, 其机理需要进一步长期深入地研究。

在不同N水平处理下, 落叶总量和凋落物总量表现出明显的季节动态, 在1年内出现明显的单峰, 这与亚热带其他地区常绿阔叶林月凋落量的季节动态模式多呈双峰型不同(王凤友, 1989)。总凋落物和落叶季节动态曲线相似, 因为落叶占总凋落物的绝大部分, 落叶在一定程度上主导着温带灌丛的凋落总量。落叶的峰值出现在10月, 因为秋季落叶高峰的到来主要是因为气温下降, 生物量达到最大, 叶衰老而大量脱落(官丽莉等, 2004)。

本实验中花果和凋落枝的波动规律相对不明显, 因为落枝和花果量动态较为复杂, 与气象条件特别是降雨、雨季末期强风干扰以及冬季积雪有关(Xu *et al.*, 2004)。此外, 本实验中除了灌丛的叶片在

11月全部落光外, 枝凋落现象在全年都存在, 荆条和绣线菊灌丛果期分别在7-10月和8-9月, 果实的凋落可能也要经历更长时间, 这些因素也是导致落枝量和花果凋落量的月动态规律不明显的原因。研究发现落枝在5月份出现一个峰值(图2B、2F), 主要是因为北京东灵山地区降雨主要集中在6、7、8月, 这3个月的降水量占全年降水量的78% (高贤明等, 2003)。植物经过漫长的休眠期, 在雨季来临之前, 体内严重缺水, 枝条尤其是小枝的韧性很差, 再加上期间常常会遭受强风, 导致枝条大量脱落。花果凋落量最大值在7-8月(图2C、2G), 主要原因是这两类灌丛的花期主要集中在6-8月。

基金项目 中国科学院战略先导性科技专项(XDA05050300)和全球变化国家重大科学研究计划(2010CB950600和2014CB954004)。

致谢 中国科学院植物研究所陈雅涵、罗永开, 北京大学姚辉等在实验中给予支持和帮助, 中国科学院北京森林生态系统定位研究站苏宏新、白帆等在野外实验中提供帮助, 一并致谢!

参考文献

- Dray JR, Gorham E (1964). Litter production in forests of the world. *Advance in Ecological Research*, 2, 101-157.
- Du EZ, Zhou Z, Li P, Hu XY, Ma YC, Wang W, Zheng CY, Zhu JX, He JS, Fang JY (2013). NEECF: A project of nutrient enrichment experiments in China's forests. *Journal of Plant Ecology*, 6, 428-435.
- Fan HB, Liu WF, Qiu XQ, Xu L, Wang Q, Chen QF (2007). Responses of litterfall production in Chinese fir plantation to increased nitrogen deposition. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 1335-1338. (in Chinese with English abstract) [樊后保, 刘文飞, 裘秀群, 徐雷, 王强, 陈秋凤 (2007). 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*, 26, 1335-1338.]
- Fang JY, Liu GH, Zhu B, Wang XK, Liu SH (2006). Carbon budgets of three temperate forest ecosystems in Dongling Mt., Beijing, China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36, 533-543. (in Chinese with English abstract) [方精云, 刘国华, 朱彪, 王效科, 刘绍辉 (2006). 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环. *中国科学D辑: 地球科学*, 36, 533-543.]
- Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, Boyer EW, Howarth RW, Seitzinger SP, Asner GP, Cleveland CC, Green PA, Holland EA, Karl DM, Michaels AF, Porter JH, Townsend AR (2004). Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70, 153-226.
- Gao XM, Du XJ, Wang ZL (2003). Comparison of seedling recruitment and establishment of *Quercus wutaishanica* in two habitats in Dongling Mountainous area, Beijing. *Acta Phytoecologica Sinica*, 27, 404-411. (in Chinese with English abstract) [高贤明, 杜晓军, 王中磊 (2003). 北京东灵山区两种生境条件下辽东栎幼苗补充与建立的比较. *植物生态学报*, 27, 404-411.]
- Gorissen A, Tietema A, Joosten NN, Estiarte M, Peñuelas J, Sowerby A, Emmett BA, Beier C (2004). Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands. *Ecosystems*, 7, 650-661.
- Guan LL, Zhou GY, Zhang DQ, Liu JX, Zhang QM (2004). Twenty years of litterfall dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghushan forest ecosystem research station. *Acta Phytoecologica Sinica*, 28, 445-456. (in Chinese with English abstract) [官丽莉, 周国逸, 张德强, 刘菊秀, 张倩媚 (2004). 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物量20年动态研究. *植物生态学报*, 28, 445-456.]
- He JS, Wang QB, Hu D (1997). Studies on the biomass of typical shrubland and their regeneration capacity after cutting. *Acta Phytoecologica Sinica*, 21, 512-520. (in Chinese with English abstract) [贺金生, 王其兵, 胡东 (1997). 长江三峡地区典型灌丛的生物量及其再生能力. *植物生态学报*, 21, 512-520.]
- Howard D, Richard B (2003). Nitrogen: The essential public enemy. *Journal of Applied Ecology*, 40, 771-781.
- Hu HF, Wang ZH, Liu GH, Fu BJ (2006). Vegetation carbon storage of major shrublands in China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 539-544. (in Chinese with English abstract) [胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰 (2006). 中国主要灌丛植被碳储量. *植物生态学报*, 30, 539-544.]
- Kikuzawa K, Asai T, Fukuchi M (1977). Leaf litter production in a plantation of *Alnus inokumae*. *Journal of Ecology*, 72, 993-999.
- Kira T, Shidei T (1967). Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western Pacific. *Japanese Journal of Ecology*, 17, 70-87.
- Kozovits AR, Bustamante MMC, Garofalo CR, Bucci S, Goldstein G (2007). Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. *Functional Ecology*, 21, 1034-1043.
- Lieth H, Whittaker RH (1975). *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, New York.
- Liu L, Greaver TL (2010). A global perspective on below-ground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 13, 819-828.
- Liu XZ, Wang GA, Li JZ, Wang Q (2009). Nitrogen isotope composition characteristics of modern plants and their variations along an altitudinal gradient in Dongling Mountain in Beijing. *Science in China (Series D: Earth*

- Sciences*, 39, 1347–1359. (in Chinese with English abstract) [刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 王庆 (2009). 北京东灵山地区现代植物氮同位素组成及其对海拔梯度的响应. *中国科学D辑: 地球科学*, 39, 1347–1359.]
- Lu M, Zhou XH, Luo YQ, Yang YH, Fang CM, Chen JK, Li B (2011). Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 140, 234–244.
- Lü Y, Zheng ZM, Meiliban M, Lu J, Wang XH (2013). Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on litterfall production and nutrient dynamics in a *Schima superba* forest in Zhejiang Province of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3027–3034. (in Chinese with English abstract) [吕妍, 郑泽梅, 美丽班·马木提, 陆江, 王希华 (2013). 增施氮磷肥对木荷林凋落物生产量及其养分的影响. *应用生态学报*, 24, 3027–3034.]
- Mo JM, Xue H, Fang YT (2004). Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1413–1420.
- Murty D, McMurtrie RE, Ryan MG (1996). Declining forest productivity in aging forest stands: A modeling analysis of alternative hypotheses. *Tree Physiology*, 16, 187–200.
- Smaill SJ, Clinton PW, Greenfield LG (2008). Nitrogen fertilizer effects on litter fall, FH layer and mineral soil characteristics in New Zealand *Pinus radiata* plantations. *Forest Ecology and Management*, 256, 564–569.
- Spiecker H (1999). Overview of recent growth trends in European forests. *Water Air and Soil Pollution*, 116, 33–46.
- Tamm CO (1991). *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems: Questions of Productivity, Vegetational Changes, and Ecosystem Stability*. Springer-Verlag, Berlin. 50–97.
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737–750.
- Wang FY (1989). Review on the study of forest litterfall. *Advances in Ecology*, 6, 82–89. (in Chinese with English abstract) [王凤友 (1989). 森林凋落量研究综述. *生态学进展*, 6, 82–89.]
- Wessel WW, Tietema A, Beier C, Emmett BA, Peñuelas J, Riis-Nielsen T (2004). A qualitative ecosystem assessment for different shrublands in western Europe under impact of climate change. *Ecosystems*, 7, 662–671.
- Xu XN, Hirata E, Shibata H (2004). Effect of typhoon disturbance on fine litterfall and related nutrient input in a sub-tropical forest on Okinawa Island, Japan. *Basic and Applied Ecology*, 5, 271–282.
- Zhang C, Zhang L, Li P, Shi WT, Xu XN (2014). Response of litter production and its seasonality to increased nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 1205–1210. (in Chinese with English abstract) [张驰, 张林, 李鹏, 施文涛, 徐小牛 (2014). 亚热带常绿阔叶林凋落物生产及季节动态对模拟氮沉降增加的响应. *生态学杂志*, 33, 1205–1210.]
- Zheng SW, Tang M (2007). Summary of research on shrub biomass in China. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 26, 189–192. (in Chinese with English abstract) [郑绍伟, 唐敏 (2007). 灌木群落及生物量研究综述. *成都大学学报(自然科学版)*, 26, 189–192.]

责任编辑: 谢宗强 责任编辑: 王 葳



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览