

氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响*

赵 琼 刘兴宇 胡亚林 曾德慧

(中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016)

摘 要：以东北林业大学帽儿山实验林场 18 年生兴安落叶松人工林为对象，研究连续 5 年 N 添加(NH_4NO_3 , $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)对落叶松各器官 N、P、K、Ca 和 Mg 含量及叶片养分再吸收效率的影响。结果表明：N 添加对叶片 5 种元素含量均无显著影响，但可显著提高树根、树枝和树干的 N 和 P 含量；N 添加能显著提高凋落叶片的 N 含量，降低凋落叶片的 C/N 比和叶片 N 再吸收效率。研究结果反映出研究区兴安落叶松人工林土壤 N 并不缺乏。N 添加导致兴安落叶松对 N 和 P 的奢侈吸收，可提高凋落物的分解速率，加快兴安落叶松人工林生态系统的 N 循环。

关键词：N 添加；兴安落叶松；养分循环；养分再吸收；奢侈吸收

中图分类号：S718.45 文献标识码：A 文章编号：1001-7488(2010)05-0014-06

Effects of Nitrogen Addition on Nutrient Allocation and Nutrient Resorption Efficiency in *Larix gmelinii*

Zhao Qiong Liu Xingyu Hu Yalin Zeng Dehui

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016)

Abstract: A field experiment was performed in an 18-year-old *Larix gmelinii* plantation in Maoershan Forest Research Station of Northeast Forestry University to study the effects of N (NH_4NO_3 , $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) addition on the contents of N, P, K, Ca and Mg in different tree components and leaf nutrient resorption efficiency in *Larix gmelinii* after five years of continuous N addition. The results showed that N addition had no significant influence on leaf nutrient contents, but significantly increased N and P contents in roots, branches and stems. N addition significantly increased N contents and decreased C/N ratio in senesced leaves, and decreased leaf N resorption efficiency. The responses of leaf nutrient contents and tree biomass to N addition suggested that soil N availability was not the limiting factor to tree growth in *Larix gmelinii* plantation. N addition resulted in the luxury consumption of N and P, made senesced leaves more decomposable, and accelerated N cycling.

Key words: N addition; *Larix gmelinii*; nutrient cycling; nutrient resorption; luxury consumption

森林生态系统的生产力与土壤肥力密切相关，人工林施肥已经成为森林可持续经营、防止地力衰退和提高林分生产力的重要措施(Binkley, 1986; Adams *et al.*, 2005)。林地施肥试验研究多见于热带、亚热带和暖温带的森林土壤(如红壤、黄壤和棕壤)，这些地区水热条件充足、土壤比较贫瘠、施肥效果显著，而北方森林(如暗棕壤)的施肥研究较少(张万儒, 1997)。然而，许多研究表明，N 素缺乏是限制北温带森林林木生长的首要因子(苏波等, 2002)。在 N 素缺乏的情况下，土壤 N 有效性的增

加能提高叶片 N 含量，促进光合作用，从而促进林木生长(Lambers *et al.*, 1998)。例如，Harding 等(1994)对美国 25 年生湿地松(*Pinus elliottii*)人工林的研究表明，施肥(N、P 和 K)后地上部分生物量增加了近 40%；Nilsen 等(2003)对挪威南部的 20~25 年生欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)和挪威云杉(*Picea abies*)人工林的研究表明，N 添加使林分的材积分别提高了 150% 和 250%。

施肥不仅影响林木生长，而且影响森林养分循环过程(Binkley, 1986)。弄清施肥对林木的养分吸

收利用过程,尤其是养分在林木体内的分配和转移(再吸收)的影响,已成为森林施肥效应研究的关键(Aerts, 1996)。尽管国外对施肥处理后林木养分吸收、分配和再吸收等研究较多,但是,研究树种以及研究区气候和土壤肥力状况的差异,导致研究结果并不一致(Aerts *et al.*, 2000; Xia *et al.*, 2008)。Houle等(2008)对加拿大同一地区的黑云杉(*Picea mariana*)和香脂冷杉(*Abies balsamea*)的研究发现,N添加显著提高了黑云杉的叶片养分含量而对香脂冷杉的叶片养分含量无显著影响。

落叶松(*Larix*)是我国东北地区重要的用材树种。近20年来,由于不合理的造林模式和经营管理,黑龙江、吉林以及内蒙古的中部和东部地区都出现了落叶松人工林地力衰退和林分生产力下降的现象(阎德仁等, 1997; Liu *et al.*, 1998)。已往有关落叶松人工林施肥效应的研究大多集中在地上生长方面,对林分养分循环过程的研究鲜有报道(董健等, 2002; 周利勋等, 2004; 孙晓梅等, 2007)。近年来,N添加对落叶松根系生态过程的研究表明,N添加对落叶松根系的生物量、分解速率、菌根侵染均有显著的影响(于立忠等, 2007; 贾淑霞等, 2007; 孙玥等, 2007; 宋森, 2008)。

本研究以速生期的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)人工林为对象,对林地进行5年N肥添加试验,分析落叶松林木各部位的养分含量及凋落叶片的养分含量,结合以往的生物量研究数据,探讨在暗棕壤上施N肥对兴安落叶松人工林养分循环过程(包括落叶松对养分的吸收、林木体内的养分分配和再吸收)的影响,为我国北方落叶松人工林的养分管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究样地位于黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山实验林场尖砬沟森林培育实验站(127°30′—127°34′E, 45°21′—45°25′N)。该地区属温带大陆性季风气候,年平均气温2.8℃,最低月均温(1月)—19.6℃,最高月均温(7月)20.9℃,≥10℃年积温2 526℃。年平均降水量700~800 mm,主要集中于7、8月份。年平均潜在蒸发量1 094 mm,全年无霜期120~140天。该区属长白山系支脉张广才岭西坡小岭余脉,为松嫩平原向张广才岭过渡的低山丘陵区,平均海拔300 m,坡度10°~15°。地带性土壤为暗棕壤,平均土层厚度40~50 cm,土壤pH值6.0左右。

2 研究方法

2.1 样地选取和N添加试验设置

研究样地为1986年栽植(2年生苗)的兴安落叶松人工纯林,株行距为1.5 m×2.0 m,2007年落叶松平均树高和胸径分别为13.80 m和12.26 cm。在山坡中上部,同一坡面,沿山坡自上而下设置了6块20 m×30 m的林地作为试验样地,其中对3块样地进行N添加处理,另3块样地作为对照。N添加样地与对照样地相间分布,每块样地间间隔5 m。从2003年开始,每年5—9月各月中旬在3块N添加样地上施N肥(NH₄NO₃),施肥量为10 g·m⁻² a⁻¹。根据土壤温度季节变化规律,5和9月施肥量均占总量的15.25%,6和8月均占21%,7月占27.5%。

2.2 样品采集和分析

于2007年8月落叶松生长旺盛期,在每块样地中选取接近平均胸径和树高、生长良好的林木5株作为取样树,取样测定林木不同部位(针叶、树枝、树干和根)的养分含量。考虑到养分含量在不同高度和方向存在差异,采集林木树冠中部不同方向的一级枝条,摘取其上的叶片混合后作为叶片样品,各龄级枝条混合作为树枝样品。采集植物样品的同时,在每块样地中用内径10 cm的土钻在0~20 cm土层随机取土柱5个混合成1个土样,每块样地取5份混合土样,以分析土壤养分。在取土样的同时,挑拣出其中的根系,作为根系样品。2007年11月落叶松针叶凋落盛期,在每块样地布置5个50 cm×50 cm的尼龙网收集器,收集凋落叶片样品。

所有植物样品于70℃下烘干、粉碎后,测定其N、P、K、Ca、Mg和有机C含量。植物全N和全P采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,流动分析仪(AutoAnalyzer III, Bran + Luebbe GmbH, Germany)测定;消煮液同时用于全K测定,植物全K采用火焰光度法测定;植物全Ca和全Mg采用550℃灰化至白色后,用HCl浸提,EDTA容量法测定;植物有机C采用油浴加热-K₂Cr₂O₇容量法测定(董鸣, 1996)。

土壤样品过2 mm筛除去杂物,充分混匀后分成2份:1份于4℃保存,并在72 h内测定硝态N、铵态N含量;另1份风干后用于测定土壤有效P和速效K含量。部分风干土碾磨过0.15 mm筛后用于测定土壤有机C、全N和全P含量。土壤有机C采用油浴加热-K₂Cr₂O₇容量法测定;土壤全N和全P采用H₂SO₄-混合催化法消煮,流动分析仪测定;有效P采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;速

效 K 采用 NH_4OAc 浸提 - 火焰光度法测定(鲁如坤, 1999)。

2.3 数据分析

叶片养分再吸收是养分循环的重要环节。养分再吸收效率指的是叶片衰老过程中再吸收的养分占叶片衰老前养分量的百分率。叶片养分再吸收效率 (RE) 的计算方法如下:

$$\text{RE} = (1 - C_1/C_2) \times 100\%。$$

式中: C_1 和 C_2 分别代表落叶和鲜叶中养分元素的质量含量。

用 EXCEL 2003 和 SPSS 13.0 对数据进行统计分析和制图。用单因素方差分析(显著性水平 $P = 0.05$)比较对照样地和 N 添加处理样地中各指标的差异。

3 结果与分析

方差分析表明,落叶松人工林 0~20 cm 土壤全 N 和硝态 N 含量在 N 添加林地显著高于对照林地,而铵态 N、有机 C、全 P、有效 P 和速效 K 含量在 N 添加林与对照林地均没有显著差异(表 1)。

表 1 N 添加对土壤(0~20 cm)养分和有机碳含量的影响^①

Tab. 1 Effects of N addition on soil nutrient and soil organic carbon contents (0~20 cm)

处理 Treatment	全 N Total N/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全 P Total P/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机碳 SOC/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态 N NO_3^- -N/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态 N NH_4^+ -N/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 P Available P/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效 K Available K/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
对照 Control	5.26 ± 0.24	1.42 ± 0.14	73.14 ± 4.01	8.62 ± 0.56	1.87 ± 0.16	16.73 ± 1.49	0.25 ± 0.04
N 添加 N addition	5.89 ± 0.25*	1.51 ± 0.12	77.42 ± 3.03	31.99 ± 2.34*	2.31 ± 0.38	15.70 ± 0.78	0.27 ± 0.04

①*: $P < 0.05$.

N 添加对落叶松针叶 N 和 P 含量均无显著影响,但树根、树枝和树干中的 N 和 P 含量在 N 添加林地中显著高于对照林地。与对照相比, N 添加林地落叶松所有器官的 K、Ca 和 Mg 含量均无显著差异(表 2)。

方差分析表明, N 添加林地中凋落叶片的 N 含量显著高于对照林地, C/N 比显著低于对照林地, P、K、Ca、Mg 及有机 C 含量与对照林地均无显著差

异(表 3)。根据新鲜叶片和凋落叶片的养分含量,本研究计算了叶片的养分再吸收效率。Mg 含量在落叶松新鲜叶片和凋落叶片中无显著差异,而 Ca 含量在凋落叶片中显著高于新鲜叶片(表 2、3)。本研究仅计算了 N、P 和 K 3 种元素的再吸收效率。N 添加显著降低了叶片 N 的再吸收效率($P < 0.01$),而对叶片 P 和 K 的再吸收效率无显著影响($P > 0.05$)(表 4)。

表 2 N 添加对兴安落叶松各器官养分含量的影响^①

Tab. 2 Effects of N addition on nutrient contents in different tree components of *Larix gmelinii*

组分 Component	处理 Treatment	N	P	K	Ca	Mg
针叶 Leaves	对照 Control	11.34 ± 0.23	2.71 ± 0.16	6.99 ± 0.23	4.45 ± 0.28	1.91 ± 0.08
	N 添加 N addition	11.35 ± 0.28	2.54 ± 0.22	7.52 ± 0.54	4.51 ± 0.33	1.63 ± 0.11
根 Roots	对照 Control	7.41 ± 0.37	1.56 ± 0.20	2.66 ± 0.09	5.08 ± 0.25	1.51 ± 0.16
	N 添加 N addition	8.39 ± 0.38*	2.79 ± 0.19**	2.93 ± 0.09	5.87 ± 0.38	1.34 ± 0.16
树枝 Branches	对照 Control	2.84 ± 0.14	0.61 ± 0.02	2.25 ± 0.32	4.93 ± 0.32	1.03 ± 0.24
	N 添加 N addition	3.46 ± 0.15**	0.83 ± 0.07**	2.20 ± 0.20	4.13 ± 0.50	0.90 ± 0.20
树干 Stem	对照 Control	0.92 ± 0.18	0.22 ± 0.06	0.96 ± 0.17	0.92 ± 0.12	0.54 ± 0.06
	N 添加 N addition	1.37 ± 0.22*	0.40 ± 0.07*	0.87 ± 0.17	1.05 ± 0.13	0.47 ± 0.05

①*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. 下同 The same below.

表 3 N 添加对兴安落叶松凋落叶片养分含量的影响

Tab. 3 Effects of N addition on nutrient contents in senesced leaves of *Larix gmelinii*

处理 Treatment	C	N	P	K	Ca	Mg	C/N
对照 Control	494.19 ± 14.85	6.18 ± 0.19	0.96 ± 0.14	2.62 ± 0.18	6.46 ± 0.22	1.87 ± 0.14	80.29 ± 4.63
N 添加 N addition	485.37 ± 16.02	8.09 ± 0.28*	0.98 ± 0.13	2.67 ± 0.23	6.87 ± 0.23	1.69 ± 0.13	60.29 ± 6.28*

表 4 N 添加对兴安落叶松叶片养分再吸收效率的影响

Tab. 4 Effects of N addition on leaf nutrient resorption

efficiency of *Larix gmelinii*

%

处理 Treatment	N	P	K
对照 Control	(45.5 ± 2.53)	(64.6 ± 3.85)	(62.5 ± 4.06)
N 添加 N addition	(28.72 ± 1.87)	(61.4 ± 0.98)	(69.7 ± 6.46)

4 结论与讨论

本研究中连续 5 年的 N 添加对兴安落叶松人工林土壤铵态 N 的影响不显著,但显著提高了土壤硝态 N 含量(表 1)。这与国内外许多森林 NH_4NO_3 添加试验结果一致(Houle *et al.*, 2008; Blazier *et al.*, 2008)。土壤铵态 N 含量未发生变化可能是由于铵态 N 在土壤中的转化特性和落叶松对不同形态 N 的偏好吸收 2 方面的因素导致的。土壤中铵态 N 除很小的一部分被土壤颗粒吸附和植物吸收外,大部分通过微生物的作用被转化为硝态 N,在土壤中难以大量贮存(黄昌勇, 2000)。此外,兴安落叶松很可能存在对土壤中铵态 N 的偏好吸收。Arnold 等(1991)盆栽试验表明,日本落叶松(*Larix leptolepis*)主要吸收铵态 N。硝态 N 含量在 N 添加林地中的显著提高,这不仅仅是由于 NH_4NO_3 添加的直接效应,而且可能源于 N 添加提高了土壤中 N 的矿化和硝化速率。许多研究表明,N 添加能在短期内促进土壤的矿化和硝化作用,使得硝态 N 成为无机 N 中的优势成分(苏波等, 2002)。值得一提的是,硝态 N 在土壤中的累积将会增加土壤 N 淋溶的可能性,而且硝态 N 淋溶的同时往往会导致 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子的淋失和土壤的酸化(Gundersen *et al.*, 1998; 方华军等, 2007)。为明确 N 添加对土壤 N 有效性以及 N 损失的影响机制,应对土壤 N 转化各过程展开进一步研究。

植物体内养分含量是土壤养分供应能力的直接反应。叶片是植物体内生理代谢最为活跃的器官,被认为是对土壤养分供应水平变化最为敏感的部位(Tamm, 1995)。许多研究表明,在养分供应不足的情况下,树木叶片养分含量与土壤养分供应水平、树木生长之间有较强的相关性(Wang *et al.*, 1997; Hobbie *et al.*, 2002)。树木叶片 N 和 P 含量和 N/P 比曾被广泛作为判断树木是否受 N 和 P 限制的指标(赵琼等, 2009)。然而,在土壤养分含量丰富的情况下,叶片养分含量与土壤养分供应量并无显著相关性(周建斌, 1993; Högberg *et al.*, 1998)。

本研究中,尽管 N 添加导致林地土壤全 N 和有效 N 含量增加,但对落叶松针叶 N 含量没有明显影

响(表 2)。同一试验林地中 N 添加 2 年后对生物量的调查研究表明,N 添加对落叶松各部位生物量和总生物量均无显著影响(梅莉, 2006)。该结果说明林地本身土壤肥力较高,N 不是落叶松生长的限制因子。立地调查也表明,研究区是黑龙江林区潜在生产力最高的地区之一(向开馥等, 1989)。与本研究结果相似,Son 等(2000)对韩国中部 40 年生日本落叶松(*Larix kaempferi*)人工林的研究也发现,由于土壤肥力较高,施肥(N 和 P)对叶片 N 含量无显著影响。土壤供 N 量过高,反而会对植物产生毒害作用,容易导致植物体内其他养分出现稀释效应,引起营养失调(Huttl, 1990)。本研究中,叶片 P, K, Ca 和 Mg 含量并未因 N 添加而降低,可见,连续 5 年 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 剂量的 N (NH_4NO_3) 添加既未促进落叶松的生长,也未对其产生毒害作用。

本研究中,对照和 N 添加林地落叶松针叶 N/P 比分别为 4.7 和 4.3,受 N 添加的影响不显著。该 N/P 比较低,明显低于国内外许多研究中判断树木是否受 N 和 P 限制的临界值(10)(Güsewell, 2004)。该结果进一步证实,判断树木是否受 N 和 P 限制的叶片 N/P 临界比在不同研究区域、不同树种之间存在很大差异。

树木的根系、树枝和树干是养分贮存的重要器官。本研究中,N 添加导致树根、树枝和树干中的 N 和 P 含量显著提高。这反映了落叶松对 N 和 P 的奢侈吸收。奢侈吸收是指当土壤的养分供应量大于植物需求量时,植物会过多地吸收一部分养分贮存起来,这在许多研究中都有报道(Aerts *et al.*, 2000)。例如,沈善敏等(1992)研究表明,在杨树生长季后期,大量的养分被转移到根系、树枝和树干中贮藏。与本研究结果不一致的是,贾淑霞等(2007)于 N 添加处理 1 年后对同一试验林地 0~30 cm 土层中的根系取样分析表明,N 添加对根系 N 含量无显著影响。该结果与本研究结果的差异可能是由处理时间长短不同而引起的。这也反映了 N 添加对林木体内养分含量的影响可能随着施肥时间的延长而变化。因此,要更全面地理解 N 添加效应,应加强对施肥下林木养分状况的动态变化规律研究。

在植物必需的各种养分元素中,N 和 P 之间的关系最为密切,二者在吸收、利用方面相互影响。一些研究表明,N 和 P 吸收利用之间存在协同作用,N 添加常能促进植物对 P 的吸收,P 添加也能促进植物对 N 的吸收(Graciano *et al.*, 2006)。本研究中,尽管落叶松的生物量未受 N 添加的影响,但 N 添加显著提高了根系、树枝和树干中 N 和 P 的含量。可

见 N 添加不仅促进了落叶松对 N 的吸收,也促进了树木对 P 的吸收。

C/N 比是经常被用于评价凋落物质量的指标, C/N 比低的凋落物通常分解速率更快(Vitousek *et al.*, 1994; Gholz *et al.*, 2000)。本研究中, N 添加林地的凋落物 C/N 比显著低于对照林地,表明 N 添加林地凋落物分解快,有利于其养分归还土壤,从而加快了林地的养分循环速率。N 添加导致凋落叶片 N 含量增加和 C/N 比降低在以往的研究中也有报道(Enoki *et al.*, 1999; Kozovits *et al.*, 2007)。Kozovits 等(2007)对巴西亚热带稀树草原 5 种树木的施肥试验研究表明,大部分物种叶片 N 含量对 N 添加没有响应,而凋落叶片的 N 含量增加, C/N 比降低。一些研究者认为,凋落叶片中养分含量的变化是控制叶片养分再吸收能力变化的主要因子,在养分循环中起着非常重要的作用(Killingbeck, 1996; Enoki *et al.*, 1999)。凋落物分解是森林养分循环的重要环节,因此, N 添加条件下凋落物分解速率及分解过程中养分释放过程值得进一步研究。

养分再吸收是植物本身保存养分的一种生存策略(Aerts, 1996)。本研究中 N 添加林地的 N 再吸收效率较对照林地低,反映了 N 添加林地的 N 归还量增多,促进了林地的养分循环。土壤养分有效性对植物养分再吸收效率有无影响一直是生态学界争论的焦点之一,以往不同的研究得出的结论不尽相同。Aerts(1996)对 60 个物种的施肥试验数据进行总结,其中 63% 的物种的养分再吸收效率对施肥没有响应, 32% 的物种的养分再吸收效率因施肥而下降。Enoki 等(1999)对黑松(*Pinus thunbergii*)的研究发现,黑松叶片养分再吸收效率随着土壤 N 有效性的降低从 43% 提高到 77%。另一些研究发现,叶片养分再吸收效率不受土壤养分有效性影响(Chapin *et al.*, 1991, Arco *et al.*, 1991)。Son 等(2000)的研究表明,施肥(N 和 P)使日本落叶松 N 再吸收效率提高,而刚松(*Pinus rigida*)的 N 再吸收效率下降。本研究结果表明,即使在土壤 N 供应很充足的情况下, N 添加仍能显著降低叶片 N 再吸收效率,支持土壤养分有效性对植物养分再吸收效率有影响这一观点。Kober 等(2005)认为,出现不同研究结果的主要原因是树种的差异、环境因素的影响和方法上的差异。比如,光照、水分、虫害等都能影响养分再吸收,而由于叶片在衰老过程中质量的下降和叶面积的萎缩,以质量和叶面积来表征养分再吸收存在约 20% 和 10% 的误差。可见,对于养分再吸收的研究不论是在方法上还是理论上都有待进

一步的完善。为此,有研究者提出了一些新的养分再吸收指标,如 Killingbeck(1996)提出的强调凋落叶片养分含量的养分再吸收能力(resorption proficiency)和 Herrwaarden 等(2003)提出的包含叶片衰老过程中质量和面积变化的实际养分再吸收效率(real resorption efficiency),但其适用性并未得到广泛的证实。

连续 5 年 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 剂量的 N 添加(通过 NH_4NO_3)对兴安落叶松的生物量和叶片养分含量均无显著影响,说明研究区 N 并非兴安落叶松生长的限制因子,该地区培育兴安落叶松人工林不需要施肥,过多施肥将会增加硝态 N 的淋溶。然而,长期的 N 添加显著改变了兴安落叶松人工林的 N 和 P 循环过程。这体现在林木的养分吸收、养分再吸收以及养分归还 3 个过程中:首先, N 添加引起了兴安落叶松对 N 和 P 的奢侈吸收,吸收的过多养分被贮存在树根、树枝和树干中;其次, N 添加显著降低了叶片的 N 再吸收效率;最后, N 添加提高了兴安落叶松凋落叶片 N 含量,降低了凋落叶片的 C/N 比,从而加快了凋落物的分解速率和 N 归还量。土壤中 N 的转化和淋失以及凋落物分解是 N 添加对兴安落叶松人工林养分循环影响的关键过程,值得进一步研究。

参 考 文 献

- 董 健, 尤文忠, 范俊岗, 等. 2002. 日本落叶松近熟林施肥效应. 东北林业大学学报, 30(3): 8-12.
- 董 鸣. 1996. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社.
- 方华军, 程淑兰, 于贵瑞. 2007. 森林土壤碳、氮淋失过程及其形成机制研究进展. 地理科学进展, 26(3): 29-37.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 贾淑霞, 王政权, 梅 莉, 等. 2007. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 31(3): 372-379.
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 梅 莉. 2006. 水曲柳落叶松人工林细根周转与碳分配. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文.
- 沈善敏, 宇万太, 张 璐, 等. 1992. 杨树主要营养元素内循环研究. I. 落叶前后各部位养分含量及养分贮量变化. 应用生态学报, 3(4): 296-301.
- 宋 森. 2008. 水曲柳和兴安落叶松人工林细根分解研究. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文.
- 苏 波, 韩兴国, 渠春梅, 等. 2002. 森林土壤氮素可利用性的影响因素研究综述. 生态学杂志, 21(2): 40-46.
- 孙晓梅, 张守攻, 祁万宜, 等. 2007. 北亚热带高山区日本落叶松幼龄林施肥技术的研究. 林业科学研究, 20(1): 68-73.
- 孙 玥, 全奎奎, 贾淑霞, 等. 2007. 施用氮肥对落叶松人工林一级根外生菌根侵染及形态的影响. 应用生态学报, 18(8): 1727-1732.

- 向开馥. 1989. 东北西部内蒙古东部防护林研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社.
- 阎德仁, 王晶莹, 杨茂仁. 1997. 落叶松人工林土壤衰退趋势. 生态学杂志, 16(2): 62-66.
- 于立忠, 丁国泉, 朱教君, 等. 2007. 施肥对日本落叶松人工林细根生物量的影响. 应用生态学报, 18(4): 713-720
- 张万儒. 1997. 中国森林立地. 北京: 科学出版社.
- 赵琼, 曾德慧. 2009. 林木生长氮磷限制的诊断方法研究进展. 生态学杂志, 28(1): 122-128.
- 周建斌. 1993. 林木叶片营养诊断研究进展. 陕西林业科技, (2): 17-21.
- 周利勋, 刘广平, 王金波. 2004. 落叶松人工林的施肥效应. 东北林业大学学报, 32(2): 16-18.
- Adams A B, Harrison R B, Sletten R S, et al. 2005. Nitrogen-fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest. Forest Ecology and Management, 220: 313-325.
- Aerts R, Chapin F S. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research, 30: 1-67.
- Aerts R. 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns. Journal of Ecology, 84: 597-608.
- Arco J M D, Escudero A, Garrido M V. 1991. Effects of site characteristics on nitrogen retranslocation from senescing leaves. Ecology, 72: 701-708.
- Arnold G, Diest A V. 1991. Nitrogen supply, tree growth and soil acidification. Fertilizer Research, 27: 29-38.
- Binkley D. 1986. Forest nutrition management. New York: J. Wiley & Sons.
- Blazier M A, Hennessey T C. 2008. Seasonal soil and foliage nutrient dynamics of a juvenile loblolly pine plantation: impacts of fertilizer formulation and vegetation suppression. Forest Ecology and Management, 255: 3404-3415.
- Chapin F S, Moilanen L. 1991. Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from Alaskan birch leaves. Ecology, 72: 709-715.
- Enoki T, Kawaguchi H. 1999. Nitrogen resorption from needles of *Pinus thunbergii* Parl. growing along a topographic gradient of soil nutrient availability. Ecological Research, 14: 1-8.
- Gholz H L, Wedin D A, Smitherman S M, et al. 2000. Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition. Global Change Biology, 6: 751-765.
- Graciano C, Goya J F, Frangi J L, et al. 2006. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. Forest Ecology and Management, 236: 202-210.
- Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, et al. 1998. Impacts of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data. Forest Ecology and Management, 101: 37-55.
- Güsewell S. 2004. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 164: 243-266.
- Harding R B, Jokela E J. 1994. Long-term effects of forest fertilization on site organic matter and nutrients. Soil Science Society of America Journal, 58: 216-221.
- Herrwaarden L M van, Toet S, Aerts R. 2003. Current measures of nutrient resorption efficiency lead to a substantial underestimation of real resorption efficiency: facts and solution. Oikos, 101: 664-669.
- Hobbie S E, Gough L. 2002. Foliar and soil nutrient in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. Oecologia, 131: 453-462.
- Högberg P, Högbom L, Schinkel H. 1998. Nitrogen-related root variables of trees along an N-deposition gradient in Europe. Tree Physiology, 18: 823-828.
- Houle D, Moore J D. 2008. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to 3-year of ammonium-nitrate addition in two boreal forests of Québec, Canada. Forest Ecology and Management, 225: 2049-2060.
- Huttl R F. 1990. Nutrient supply and fertilizer experiments in view of N saturation. Plant and Soil, 128: 45-48.
- Killingbeck K T. 1996. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. Ecology, 77: 1716-1727.
- Kober R K, Lepczyk C A, Iyer M. 2005. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set. Ecology, 86: 2780-2792.
- Kozovits A R, Bustamante M M C, Garofalo C R, et al. 2007. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. Functional Ecology, 21: 1034-1043.
- Lambers H, Chapin III F S, Pons T L. 1998. Plant physiological ecology. New York: Springer-Verlag.
- Liu S R, Li X M, Niu L M. 1998. The degradation of soil fertility in pure larch plantations in the northeastern part of China. Ecological Engineering, 10: 75-86.
- Nilsen P, Abrahamsen G. 2003. Scots pine and Norway spruce stands responses to annual N, P and Mg fertilization. Forest Ecology and Management, 174: 221-232.
- Son Y, Lee L K, Ryu S R. 2000. Nitrogen and phosphorus dynamics in foliage and twig of pitch pine and Japanese larch plantations in relation to fertilization. Journal of Plant Nutrition, 23: 697-710.
- Tamm C O. 1995. Towards an understanding of relations between tree nutrition, nutrient cycling and environment. Plant and Soil, 168/169: 21-27.
- Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, et al. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models. Ecology, 75: 418-429.
- Wang G G, Klinka K. 1997. White spruce foliar nutrient concentrations in relation to tree growth and soil nutrient amounts. Forest Ecology and Management, 98: 89-99.
- Xia J Y, Wan S Q. 2008. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition. New Phytologist, 179: 428-439.