

氮沉降对植物生长的影响研究进展

毛晋花¹, 邢亚娟¹, 马宏宇², 王庆贵¹

(¹黑龙江大学农业资源与环境学院, 哈尔滨 150080; ²长白山科学研究院, 吉林二道白河 133613)

摘要:为了探索全球氮沉降加剧背景下植物生长所受的影响,笔者归纳了森林植物不同生长指标对氮沉降响应的国内外文献数据。在既有研究成果的基础上,详细总结了氮沉降对植物地上部形态(株高、基径)、光合生理(光合色素含量、净光合速率)、可溶性糖含量、地上及地下生物量分配比例、根系形态结构(根长、根直径和根系生物量)以及叶片中氮:磷等指标的影响,并对上述变化做了合理的分析。笔者指出氮沉降加剧在一定程度上对植物的各生长指标都有明显的促进作用,但当氮沉降很严重时,植物的生长就会受到限制。笔者发现目前关于氮沉降对植物生长影响的试验中,很多都是短期模拟试验,而且大多数试验都是有关现象的研究而非原理的探索。笔者认为在今后的研究中应该将模拟时间进一步延长,并对造成响应变化的机理进行探索,以期更好的为进一步研究氮沉降增加对森林植物生长状况的影响提供参考依据。

关键词:氮沉降;植物生长;影响;生物量

中图分类号:X171.1

文献标志码:A

论文编号:casb16110061

Research Progress of Nitrogen Deposition Effect on Plant Growth

Mao Jinhua¹, Xing Yajuan¹, Ma Hongyu², Wang Qinggui¹

(¹College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080;

²Changbaishan Academy of Science, Erdaobaihe Jilin 133613)

Abstract: To explore the effect of global nitrogen (N) deposition intensifying on plant growth, we summarized the literature data of different growth indices of forest plant to N deposition in this paper. On the basis of previous research results, we summarized the effects of N deposition on plant morphology above the ground (plant height, stem base diameter), photosynthetic physiology (content of photosynthetic pigments, net photosynthetic rate), soluble sugar content, biomass allocation proportion between aboveground and underground, root morphology structure (length, diameter and biomass of root system) and stoichiometric ratio between N and P in leaf, then we made an analysis of the above changes. It pointed out that the increase of N deposition obviously promoted every plant growth index to some extent; however, the growth of plants would be restrained when the N deposition was serious. We found that many current N deposition simulation experiments were short-termed and most of them paid more attention to the phenomena rather than the mechanism. It was suggested that the duration of simulation experiments should be further extended and the

基金项目:国家自然科学基金项目“大兴安岭北方森林细根动态和形态特征对氮沉降的响应”(41575137),“大兴安岭北方森林生态系统对N沉降增加的响应”(31370494),“小兴安岭阔叶红松林生态系统对N沉降增加的响应”(31170421),“气候变化背景下小兴安岭阔叶红松林土壤碳汇变化机理”(31070406);黑龙江省自然科学基金重点项目“黑龙江省寒温带针叶林生态系统碳循环对模拟N沉降的响应”(ZD201406);长白山科学研究院开放基金项目“长白山阔叶红松林生态系统细根动态和形态特征对氮沉降的响应”(2016001);黑龙江省科研机构创新能力提升专项计划“抗寒速生用材树种新种质创制及培育技术研究”(YC2014D005)。

第一作者简介:毛晋花,女,1993年出生,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为植物生长对外源碳氮增加的响应。通信地址:150080 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路74号 黑龙江大学农业资源与环境学院,E-mail:2276383317@qq.com。

通讯作者:王庆贵,男,1970年出生,河北邢台人,教授,博士,主要从事生态系统生态学研究。通信地址:150080 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路74号 黑龙江大学农业资源与环境学院,E-mail:qgwang1970@163.com。

收稿日期:2016-11-14, **修回日期:**2016-12-23。

mechanism of changes should be explored in order to provide references for further study the effect of N deposition on the growth of forest plant.

Key words: nitrogen deposition; plant growth; influence; biomass

0 引言

工业革命以前,地球表面的氮沉降很低,大气氮沉降几乎不会对森林植物的生长有不良影响,很多地区的植物生长可能还会受到土壤氮素的限制。工业革命以来,由于人口的增加,含氮化肥的使用、森林的砍伐以及化石燃料燃烧等导致大气氮浓度升高,氮沉降也日益加剧。东亚国家近年来经历了急速的人口和经济增长,过量的化石燃料的燃烧使硫化物和氮氧化物的排放量也明显增加^[1]。2012年的一份报告指出,东亚国家的二氧化硫和氮化物的排放量分别占全球总排放量的36%和29%,远超过美国和欧洲^[2]。到2020年,中国的氮氧化物排放量可能会达到9.3 Tg,相比于1990年增加180%,如果不采取有效的环保措施,这一增长比例可能会增长210%^[3]。据估计,中国人为导致的氮沉降量已经从0.8 g/(m²·a)上升到2.1 g/(m²·a),在氮沉降集中地,这一数字可能达到8~9 g/(m²·a),在未来甚至可能更高^[4]。

氮沉降会带来一系列问题。有报道称大气氮沉降会对欧洲的生态栖息地产生不利影响,而这些影响主要和土壤氮富集以及有效氮增加有关^[5]。人为的氮沉降会影响全球碳循环和植物的多样性,对生态系统来说,是一个重大的威胁^[6]。在过去的几十年里,中国的氮沉降明显的影响了生态系统的结构和功能,包括人工林和天然林^[4,7]。欧洲氮评估机构称氮素会影响植物质量,改变植物群落分布,酸化土壤并且可能会使生产力降低^[8]。上述研究可以看出,氮沉降增多势必会对植物生长产生影响。基于此,越来越多的生态专家格外关注氮沉降对生态系统的影响。早在20世纪后半叶,在有关森林的研究中,氮素就成为主要的聚焦点,氮沉降对北半球温带地区森林影响的研究已经超过了30年^[9]。对氮沉降的长期研究是环境科学最重要的焦点之一^[10]。通过植物功能性状的变化来探讨生态系统功能、群落以及物种对全球变化响应这一问题具有重要意义。森林作为陆地生态系统的主体,在减缓全球变化过程中发挥着重要作用,因此在氮沉降急剧增加的背景下探讨森林植物生长对氮沉降响应的研究就显得极为重要。

氮是植物生长的必需元素,作为植物生长最主要的限制因子之一,随着氮沉降的增加,土壤中可利用的氮以及植物体内氮的积累势必也会增加,会对植物的

生长发育产生影响^[11]。Galloway等^[12]研究表明,适度比例的有效氮的增加可以作为肥料来促进碳同化物质的吸收以及植物的生长,但一旦氮水平超过临界值,可能就会对植物的性状产生负作用。Schulze^[13]指出,森林中过量的氮供应和树木活性的降低有不可分割的关联,过量的氮会导致植物体内的养分失衡,或者造成土壤酸化,从而不利于植株生长。笔者根据国内外现有研究数据,通过对植物各生长指标(地上部形态、根系、光合作用指标、生物量分配、叶片化学计量比等)对于氮沉降响应的综述,分析了氮沉降增加对植物生长状况的影响。

1 氮沉降增加对植物地上形态指标的影响

植物地上部易观察,而且地上部可以很直观的表达到植物的生长状况,在现有的研究中,氮沉降对植物地上形态指标的影响主要为株高和地径。

通过研究植物株高和地径对氮沉降的响应,能较直观的看到氮沉降对植物生长的影响。很多试验的研究结果表明,植物幼苗株高和地径的增长和氮沉降有关,并且它们之间表现出正相关^[14]。李化山等^[15]的实验结果表明,油松(*Pinus tabulaeformis*)幼苗的株高和地径随着氮沉降浓度增高而出现增长趋势。肖迪等^[16]的研究也得到了同样的结果。黄玉梓等^[17]研究表明,氮沉降量增加对杉木人工林的生长起促进作用,试验中所涉及的杉木在施氮处理后其株高和生物量都有明显增加。Ceccon等^[18]通过对墨西哥两类热带森林进行养分添加的试验表明,氮添加对于次生林中幼苗的生长有很好的促进作用,表现为植株地上部的良好生长状态。Denslow等^[19]的研究表明在年代较短的夏威夷热带森林中,氮添加可有效促进植株茎干的生长。王爱英等^[20]通过对特定树种进行氮沉降的模拟试验表明,整体来看,所有水平的氮处理均能促进植物株高的伸长,但在不同氮添加水平,这种促进作用存在差异,当氮处理低于8 g/(m²·a)时,施氮浓度越高,株高也越高,但当施氮量达到或者超过这一水平时,氮处理对植物的生长表现出不利的影响,当施氮量为10 g/(m²·a)时,施氮会导致更低的生长速率,即较高的施氮量可能会抑制生长。有研究发现木荷(*Schima superba*)和黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)的株高和地径在10 g/(m²·a)的施氮水平达到最佳,而在30 g/(m²·a)的施氮水平,株高和地径都表现出显著的降低^[21]。由上述

研究结果可以发现,不同的氮浓度水平对株高和地径会产生不同的影响。适宜水平的氮浓度有利于株高和地径的生长,但高浓度氮则会抑制株高和地径的生长,研究结论的差异可能源于氮浓度的设置水平、试验地点氮含量以及物种的差异。

2 氮沉降对植物光合的影响

氮是大多数陆地植物光合作用的主要限制因子,氮含量的高低对植物体内叶绿素含量和光合酶类的生理过程有着至关重要的影响,而叶绿素含量和光合酶类对调节光合作用起直接作用。所以氮沉降的加剧对植物的光合作用势必会产生影响。

2.1 氮沉降对植物光合色素含量的影响

叶片中光合色素含量是反映植物光合能力的一个重要参数,环境因子的改变会引起光合色素含量的变化。绿色植物对光能的吸收、传递和转化主要是通过光合色素中的叶绿素来实现的。大量的研究数据表明,适度的氮输入会引起叶片光合色素含量的增加。李红梅等^[22]的研究表明,氮浓度增高促进了墨西哥柏(*Cupressus lusitanica*)幼苗的光合色素含量。辛月等^[23]的研究表明,一定范围的氮沉降可以提高青杨(*Populus cathayana*)的叶绿素含量进而促进其光合作用,而过多的施氮量会使促进作用有所下降。Zhang等^[24]的研究发现,氮添加能使羊草(*Leymus chinensis*)和芦苇(*Phragmites communis*)的类胡萝卜素明显增加。张蕊等^[25]的研究结果表明,当氮添加浓度达 $20\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 时依旧会增大植物的叶绿素含量,但是和低浓度氮相比,这一浓度的氮对叶绿素含量的促进作用有所减弱。也有研究表现出不同的结果,蒋思思等^[26]通过对不同种源的油松幼苗进行施氮处理发现,有2个种源油松幼苗的叶绿素含量不会受到氮沉降的明显影响,原因可能是施氮时间过短。总体来说,施氮在一定范围内,可以提高植物叶片的光合色素含量,但这种促进作用不是无限的,当氮沉降浓度过高时,植物光合色素的合成可能会受抑制,进而导致植株的光合作用受阻。

2.2 氮沉降对植物净光合速率的影响

Wang等^[27]通过对油松幼苗进行模拟氮沉降试验发现,在中氮处理水平为 $11.2\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 时,油松幼苗的净光合速率达到最大,但在高氮处理水平 $22.4\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 时,油松幼苗的净光合速率表现出明显的下降趋势。王晓荣等^[28]通过对常见的栎属(*Quercus*)树种幼苗进行施氮试验也得出了一致的结论,结果表明随着氮沉降浓度的增加,栎属中的3个树种的净光合速率表现为先增加后降低的趋势,表明一定程度的氮沉降可以

促进栎属树种净光合速率的增加。在大多数氮限制的森林中,增加有效氮可以提高植物的净光合速率^[29]。由此可见,一定浓度的氮沉降可以提高植株的净光合速率,但当氮沉降浓度超过阈值时,植物的净光合速率会受到抑制,即氮沉降对植株净光合速率的提高只限定在一定浓度范围内。

总之,氮沉降对植物光合作用的影响主要是通过改变叶片中与光合作用有关的酶活性来实现的,当氮沉降在一定范围内时,酶活性、浓度以及叶绿素的含量提高,进而使植物的光合作用得到加强。当氮浓度超过一定值后,植物体内的营养均衡被打破,而营养失衡对光合作用不利,表现为高浓度氮沉降会抑制植物的光合速率。

3 氮沉降对植物体内可溶性糖含量的影响

植物生长所消耗的能量有一部分是由植物体内的可溶性糖(SS)提供。可溶性糖是植物维管束中最重要渗透调节物质之一,在植物抗逆境过程中起重要作用。植物生长受环境因子的影响可从其体内可溶性糖含量的变化得以反映。Han等^[30]的研究也得到了同样的结果,随着氮浓度的升高,植株中的可溶性糖含量呈下降趋势。但也有研究表明植物中的可溶性糖的含量在氮添加的条件下会升高^[31]。Zhang等^[32]的研究表明,氮添加会显著增加羊草叶片中的可溶性糖含量,但该项研究中的另一种植物,芦苇植株中的可溶性糖对氮沉降响应不明显,原因可能是芦苇的根系较深,少量的氮添加不会对其生长产生显著影响。

综上所述,关于氮沉降对植物可溶性糖含量的影响尚无定论,要想得出可靠结论,需进行大量试验,并扩大试验物种的范围。

4 氮沉降对植物地上/地下部生物量分配比例的影响

不同器官的有机物分配比重是植物对外界环境响应和自身调节的结果,植株体内的有机物分配往往会根据外界环境的变化处于动态变化之中,以提高自身对环境的适应能力。大气氮沉降引起的有效氮的增多可能会影响光合作用产物在植物各器官中的分配^[33],氮素营养的改变势必会改变植物体内的碳分配格局。

氮沉降能增加北温带维管束植物叶片的年产量,进而转化成一小部分生产力^[34]。刘洋等^[35]发现,施氮处理使巨桉(*Eucalyptus grandis*)的茎重比和叶重比明显增大,而根重比则随着施氮处理表现出明显的降低。增加有效氮会减少根重比,这可能是因为在有效氮可变的情况下,植物根系的碳素分配要符合功能平衡假说^[36]。李明月等^[37]的研究结果表明,在外源施氮量增加的情况下,植株叶重比呈升高趋势,但根冠比与

根重比则表现为降低趋势。辛月等^[23]对青杨进行氮沉降的模拟试验发现,随着氮浓度的升高,植株的根冠比逐渐降低,这一指标说明氮沉降会促进地上部分生长,而对地下部分的生长不利。Wang^[27]通过对油松幼苗进行外源氮沉降的模拟研究表明,油松幼苗的根叶比在中氮处理 $11.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 时显著下降,在高氮处理 $22.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 时达到最大值。Gordon 等^[38]的研究表明,有效氮的增加可能会导致根茎比的降低。由此可见,氮沉降有可能对地上部分的生长有促进作用,而不利于植物根系的生长。当土壤中的营养元素不足时,根系作为主要吸收养分的器官,更多的生物量会被分配给根部,此时植株地上部分的生长受抑制。当土壤中的养分充足时,为了适应不同的养分条件,对树木进行额外施肥会使植株地上部分的生长受到促进,即更多的营养元素会投入到枝叶中而非植株的根系中。但由于树种生长习性的差异性,氮沉降对各树种可能会有不同的生物量分配规律,因此,还需要在多物种间进行试验,进而得出较为客观的结论。

5 氮沉降对细根形态结构的影响

根系是植物重要的组成部分,是摄取、运输和储存碳水化合物和营养物质的器官,在生态系统能量流动和物质循环中发挥着关键作用。根系的形态特征变化能很好的反映外界环境的变化,按照不同的径级,可将植物根系分级,一般将直径 $< 2 \text{ mm}$ 的根称为细根,主要吸收养分。细根形态会随着外界环境的变化而改变,其变化又会影响吸收养分的能力。地下细根在长期进化过程中形成了匹配立地条件的空间分异特征和径级分配规律,具有较强的生态可塑性,植物可以通过调节细根的生长来最优的获取营养资源^[39]。探究氮沉降对细根形态结构影响的研究,将更有利于我们了解森林地下部对于持续氮沉降的响应机理,这在氮沉降日益严重的当下具有重要意义。

5.1 氮沉降对细根根长的影响

细根长度的变化可以引起其表面积的变化,能够增强其探索、吸收养分的能力,进而影响整株植物的生长。

湿地松 (*Pinus elliottii*) 细根的总长在为期一年半的外源氮添加的影响下显示出明显的增加^[40],这可能和试验样地较低的磷含量有关。周晓兵等^[41]通过对干旱半干旱地区进行施氮试验表明,植物的根长会随着氮浓度的增加而显著增长,即施氮可以促进植物根系的伸长。但也有研究表现出不同的结果,Wang 等^[42]的研究结果表明,在氮限制的森林中,外源氮添加显著地降低了细根的总长度。李红梅等^[43]的研究也表现出了

相同的趋势,其研究结果表明,氮沉降的增加会逐步抑制墨西哥柏幼苗根系总长度的生长,这可能是因为外源施氮使土壤中的养分限制得以缓解,根系竞争力变弱,植物不需要伸长根去吸收养分,进而表现为外源施氮不利于细根的伸长。Benton 等^[44]的研究结果也表明,施氮的确会使细根的总长有所减少。上述不同的研究结果,可能和研究材料的类型、试验地的氮含量有关。总的来说,氮沉降会对植物细根根长产生影响,但具体影响及机理还需大量试验研究加以验证。

5.2 氮沉降对细根直径的影响

细根直径是细根形态的一个重要指标,极易受外界环境的影响,外源氮的增加势必会影响地下细根生物量的径级分配特征。

于立忠等^[45]对施肥 1 年的日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 进行研究时发现,在土壤表层 (0~10 cm) 施加氮肥使落叶松一级根的平均直径明显降低。徐钰等^[46]通过对杨树人工林进行外源施氮试验,结果表明外源氮增加可能会使 0~0.5 mm 径级根系的生物量有所增加,即外源氮可能会使杨树人工林的根变细。但是闫国永等^[47]的研究结果表明,氮沉降的增加会使根系变粗。Wang 等^[42]的研究表明,随着有效氮的增加,细根(一级根和二级根)的生物量表现出明显下降的趋势,但三级以上的根系对这一变化并没有表现出明显的响应,表明在有效氮增加的情况下,会使根系变粗。Son 等^[48]的研究也得到了同样的结果。但 Pregitzer 等^[39]发现不同径级的细根直径对施氮肥的响应不显著。

研究表明,细根直径和细根周转时间呈正相关,越细周转越快,越粗周转越慢^[49]。氮沉降对细根直径的影响为研究氮沉降对周转速率的影响奠定良好基础。而关于氮沉降对细根直径的影响,不同的试验研究得到了不同的结论,因此还需要进一步加大试验的物种数量,以期获得更为准确的结论。

5.3 氮沉降对根系生物量的影响

生物量在根系和地上的分配调节是植物生长的关键过程,当土壤养分缺乏时,植物向根系投入更多的碳同化物质,促进根系的生长,获得更多的养分。当土壤中养分充足的时候,植物根系较易获得生长发育所需要的矿物质,所以向根系分配的碳同化物质质量就会降低。当氮沉降增大时,土壤中的氮元素含量增加,必将会对细根的生物量产生影响。

吴楚等^[49]研究表明,土壤中有效氮素的含量和细根生物量之间有明显的相关性。施氮能促进细根生物量的增加,在高氮处理水平达最佳^[40]。李琛琛等^[50]研究也表明,氮沉降显著增加了华北落叶松 (*Larix*

principis)的细根生物量,这可能是由于该地区土壤本身就处于氮缺乏状态,外源施氮使土壤中可利用的氮增多,从而对细根的生长起促进作用。但也有研究表明了不同的观点,Lehto等^[51]的研究结果表明,当输入外源氮时,植物的细根生物量会有所降低,这可能是由于施氮改变了土壤中的微量元素含量,而使某些细根死亡造成的。营养元素的缺乏会导致根系碳水化合物的堆积,因此在外源施氮下生物量降低可能是由于施氮缓解了土壤中的氮限制引起的^[52]。也有研究表明,施氮和植物细根生物量之间没有必然联系^[53]。氮沉降对植物细根生物量是促进、抑制或无影响,到目前为止还没有定论。

由于细根涉及的生理过程较为复杂,目前还不能明确解释细根生长和形态变化与氮沉降之间的关系,未来可对细根结构进行全面解剖,进一步研究细根对氮沉降的响应机制。

6 氮添加对植物氮、磷分配的影响

植物的矿质营养元素含量和其化学计量比的变化能很好的反映其营养状况和生态系统的养分供应^[54]。氮和磷是植物生长所必需的矿质营养元素,而且自然界中很多植物的生长都处于磷限制环境中。植物对营养元素的吸收是按照一定的比例进行的,符合养分均衡学说,化学计量比为探讨营养元素匮乏问题提供了可靠依据。当土壤中有效氮增多时,势必会引起植物对其他营养元素吸收的变化^[55-56]。研究氮沉降背景下植株体内氮、磷分配比例的变化,对于全球大气氮沉降加重背景下的植物生长策略具有重要意义。

Liang等^[40]通过对中国亚热带地区湿地松进行人为氮添加的试验表明,氮沉降使土壤和湿地松叶片中的含氮量均有所增加,而且在高施氮水平 $12\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 时针叶中的含氮量达到最大,但针叶中的含磷量却在高施氮水平明显降低,氮:磷明显变大。Yuan等^[57]的研究表明,在不存在磷限制的温带阔叶林中,氮添加降低了叶片中的磷含量。刘洋等^[35]通过对巨桉幼苗进行外源施氮的研究表明,施氮对叶片的氮:磷有显著影响,巨桉幼苗中的磷随施氮量的增加而明显增大。李明月等^[37]的研究结果表明,氮添加增加了土壤中氮含量而降低了土壤中磷含量。而李银等^[58]通过对马尾松林、混交林和季风林进行氮添加的试验表明,和对照相比3种林型的有效磷含量没有明显变化。由上述结论可以得出,外源施氮可能会使叶片中的含氮量有所增加,会使土壤中的磷含量保持不变或者使土壤中的磷缺乏更加恶化,导致植株中的营养元素失衡,这一趋势对植株的生长很不利。

7 展望

由上述分析可见,氮沉降对森林植物的影响是多方面的,地上部形态指标、根系、光合生理、生物量分配以及化学计量比等各方面都会受到氮沉降的影响。截至目前,由于各试验中植物种类、土壤含氮量等均存在较大差异,从而导致相同指标在不同试验中对氮沉降的响应表现出不同的结果。为了更为客观地验证氮沉降对植物生长的影响,需要加强以下工作:(1)扩大研究区域并进一步延长氮沉降模拟时间。探究不同地区各类型植物对于氮沉降的响应,在现有的模拟氮沉降对植物影响的研究中,很多试验进行的是短期氮沉降试验,应该延长模拟施氮时间,以便观察长期氮沉降对于植物生长的影响,提高试验精度。(2)对植物的各生理参数进行整合、分析、归纳和概括。在现有的有关氮沉降对植物生长影响的研究中,很多都是对植物生长现象的研究,缺乏关于这一问题的机理方面的探讨,同时,由于表征植物生长状况的参数较多,很难得出氮沉降对植物生长影响的统一结论。(3)将氮沉降和其他环境因子综合考虑。氮沉降作为当今世界环境变化较为突出的一方面,研究它对于森林生态系统的影响具有重要意义。但是自然界中影响植物生长的因素很复杂,环境因子多种多样,只研究氮沉降对植物生长的影响不够全面,存在很大的不确定性,需要综合考虑更多的环境影响因素。

参考文献

- [1] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003,108(D21).
- [2] Rao S, Chirkov V, Dentener F, et al. Environmental modeling and methods for estimation of the global health impacts of air pollution [J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2012,17(6):613-622.
- [3] Qu Y, An J, He Y, et al. An overview of emissions of SO₂ and NO_x and the long-range transport of oxidized sulfur and nitrogen pollutants in East Asia[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44:13-25.
- [4] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438):459-462.
- [5] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, et al. Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments[J]. *Global Change Biology*, 2012,18(4):1197-1215.
- [6] De Schrijver A, De Frenne P, Ampoorter E, et al. Cumulative nitrogen input drives species loss in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011,20(6): 803-816.
- [7] Liu X, Duan L, Mo J, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview[J]. *Environmental pollution*, 2011,159

- (10):2251-2264.
- [8] Velthof G, Barot S, Bloem J, et al. Nitrogen as a threat to European soil quality[M].European Nitrogen Assessment. Cambridge University Press, 2011:495-512.
- [9] Andersson F, Fagerström T, Nilsson S I. Forest ecosystem responses to acid deposition-hydrogen ion budget and nitrogen/tree growth model approaches[M].Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Springer US, 1980:319-334.
- [10] Duprè C, Stevens C J, Ranke T, et al. Changes in species richness and composition in European acidic grasslands over the past 70 years: the contribution of cumulative atmospheric nitrogen deposition[J]. Global Change Biology, 2010,16(1):344-357.
- [11] Berger T W, Glatzel G. Response of *Quercus petraea* seedlings to nitrogen fertilization [J].Forest Ecology and Management,2001,149(1):1-14.
- [12] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade [J]. Bioscience, 2003,53(4):341-356.
- [13] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest[J]. Science (Washington), 1989, 244(4906):776-783.
- [14] Tamm C O. Nitrogen in Terrestrial: Questions of Productivity, Vegetational Changes, and Ecosystem Stability[M].Berlin:Springer-Verlag,1991.16
- [15] 李化山,汪金松,法蕾,等.模拟氮沉降对油松幼苗生长的影响[J].应用与环境生物学报,2013,19(5):774-780.
- [16] 肖迪,王晓洁,张凯,等.模拟氮沉降对五角枫幼苗生长的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(10):50-57.
- [17] 黄玉梓,樊后保,李燕燕,等.氮沉降对杉木人工林生长及林下植被碳库的影响[J].生态环境学报,2009,18(4):1407-1412.
- [18] Ceccon E, Sánchez S, Campo J. Tree seedling dynamics in two abandoned tropical dry forests of differing successional status in Yucatán, Mexico: a field experiment with N and P fertilization[J]. Plant Ecology, 2004,170(2):277-285.
- [19] Denslow J S, Vitousek P M, Schultz J C. Bioassays of nutrient limitation in a tropical rain forest soil[J]. Oecologia, 1987,74(3): 370-376.
- [20] Wang A Y, Wang M, Yang D, et al. Responses of hydraulics at the whole- plant level to simulated nitrogen deposition of different levels in *Fraxinus mandshurica*[J]. Tree physiology, 2016, 00, 1 - 11 doi:10.1093/treephys/tpw048.
- [21] Mo J, Li D, Gundersen P. Seedling growth response of two tropical tree species to nitrogen deposition in southern China[J]. European Journal of Forest Research, 2008,127(4):275-283.
- [22] 李红梅.模拟氮沉降对墨西哥柏幼苗的影响[D].南京:南京林业大学,2013.
- [23] 辛月,尚博,陈兴玲,等.氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响[J].环境科学学报,2016,37(9):3642-3649.
- [24] Zhang T, Yang S, Guo R, et al. Warming and Nitrogen Addition Alter Photosynthetic Pigments, Sugars and Nutrients in a Temperate Meadow Ecosystem[J]. PloS one, 2016,11(5):e0155375.
- [25] 张蕊,王艺,金国庆,等.氮沉降模拟对不同种源木荷幼苗叶片生理及光合特性的影响[J].林业科学研究,2013,2(2):207-213.
- [26] 蒋思思,魏丽萍,杨松,等.不同种源油松幼苗的光合色素和非结构性碳水化合物对模拟氮沉降的短期响应[J].生态学报,2015,35(21):7061-7070.
- [27] Wang G L. Carbon allocation of Chinese pine seedlings along a nitrogen addition gradient[J]. Forest Ecology and Management, 2014,334:114-121.
- [28] 王晓荣,潘磊,庞宏东,等.模拟氮沉降对亚热带栎属树种幼苗生长-生物量累积及光合特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2016, 36(1):78-85.
- [29] Zhao C, Liu Q. Growth and photosynthetic responses of two coniferous species to experimental warming and nitrogen fertilization[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008,39(1):1-11.
- [30] Han F, Yue X, Shi S, et al. Physiological characteristics in cold resistance of several alpine plants in Qinghai--Tibet Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004,25(12):2502-2509.
- [31] Geiger M, Haake V, Ludewig F, et al. The nitrate and ammonium nitrate supply have a major influence on the response of photosynthesis, carbon metabolism, nitrogen metabolism and growth to elevated carbon dioxide in tobacco[J]. Plant, Cell & Environment, 1999,22(10):1177-1199.
- [32] Zhang T, Yang S, Guo R, et al. Warming and Nitrogen Addition Alter Photosynthetic Pigments, Sugars and Nutrients in a Temperate Meadow Ecosystem[J]. PloS one, 2016,11(5):e0155375.
- [33] Yang Y, Guo J, Wang G, et al. Effects of drought and nitrogen addition on photosynthetic characteristics and resource allocation of *Abies fabri* seedlings in eastern Tibetan Plateau[J]. New Forests, 2012,43(4):505-518.
- [34] Bardgett R D, Wardle D A. Aboveground- belowground linkages: biotic interactions, ecosystem processes, and global change[M]. Oxford, Oxford University Press, 2010.
- [35] 刘洋,张健,陈亚梅,等.氮磷添加对巨桉幼苗生物量分配和C:N:P化学计量特征的影响[J].植物生态学报,2013,37(10):933-941.
- [36] Wilson J B. A review of evidence on the control of shoot: root ratio, in relation to models[J]. Annals of Botany, 1988, 61(4):433-449.
- [37] 李明月,王健,王振兴,等.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[J].生态学报,2013,33(5):1569-1577.
- [38] Gordon C, Woodin S J, Alexander I J, et al. Effects of increased temperature, drought and nitrogen supply on two upland perennials of contrasting functional type: *Calluna vulgaris* and *Pteridium aquilinum*[J]. New Phytologist, 1999,142(2):243-258.
- [39] Pregitzer K S, De J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees[J]. Ecological Monographs, 2002,72(2): 293-309.
- [40] Kou L, Guo D, Yang H, et al. Growth, morphological traits and mycorrhizal colonization of fine roots respond differently to nitrogen addition in a slash pine plantation in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2015, 391(1-2): 207-218.
- [41] 周晓兵,张元明.干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J].生态学报,2009,29(7):3836-3845.
- [42] Wang G, Fahey T J, Xue S. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, west China[J]. Oecologia, 2013, 171(2): 583-590.

- [43] 李红梅,万福绪,李杰,等.墨西哥柏幼苗生长和光合生理对氮沉降的响应[J].林业科技开发,2014,28(1):73-77.
- [44] Taylor B N, Strand A E, Cooper E R, et al. Root length, biomass, tissue chemistry and mycorrhizal colonization following 14 years of CO₂ enrichment and 6 years of N fertilization in a warm temperate forest[J]. Tree physiology, 2014,00:1- 11 doi:10.1093/treephys/tpu058.
- [45] 于立忠,丁国泉,史建伟,等.施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长、比根长的影响[J].应用生态学报,2007,18(5):957-962.
- [46] 徐钰,许凯,于水强,等.不同林龄杨树细根生物量分配及其对氮沉降的响应[J].生态学杂志,2014,33(3):583-591.
- [47] 闫国永,王晓春,邢亚娟,等.兴安落叶松细根解剖结构和化学组分对N沉降的响应[J].北京林业大学学报,2016,38(4):36-43.
- [48] Son Y, Hwang J H. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea[J]. Ecological research, 2003, 18(3): 339-346.
- [49] 吴楚,王政权,范志强.氮素形态处理下水曲柳幼苗养分吸收利用与生长及养分分配与生物量分配的关系[J].生态学报,2005,25(6): 1282-1290.
- [50] 李琛琛,刘宁,郭晋平,等.氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响[J].生态环境学报,2014(12):1924-1932.
- [51] Lehto T, Mälkönen E. Effects of liming and boron fertilization on boron uptake of *Picea abies*[J]. Plant and Soil, 1994, 163(1): 55-64.
- [52] Hermans C, Hammond J P, White P J, et al. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation?[J]. Trends in plant science, 2006, 11(12): 610-617.
- [53] Lee K H, Jose S B. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cotton wood and loblolly pine plantations along a nitrogen Fertilization gradient[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 185(3): 263-273.
- [54] Vitousek P M, Turner D R, Kitayama K. Foliar nutrients during long-term soil development in Hawaiian montane rain forest[J]. Ecology, 1995, 76(3): 712-720.
- [55] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of applied Ecology, 1996: 1441-1450.
- [56] Wang M, Moore T R. Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type[J]. Ecosystems, 2014, 17(4): 673-684.
- [57] Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption[J]. Ecology, 2015, 96(2): 373-380.
- [58] 李银,曾曙才,黄文娟.模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):631-636.