

干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展

周晓兵^{1,2}, 张元明^{1,*}

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:随着人类活动干扰的加剧以及全球气候变化, 大气氮沉降的生态效应日益成为人们关注的焦点。氮沉降的增加能够带来生态系统结构和功能的改变, 引起一系列生态效应。氮沉降对干旱半干旱地区生态系统的影响主要包括以下方面: (1) 在干旱半干旱地区, 氮沉降主要以脉冲形式进入氮循环进而影响其它生态过程; (2) 氮沉降能够增加土壤氮矿化和土壤无机氮浓度, 但氮循环还会受许多其它因素的影响; (3) 氮沉降对土壤微生物代谢活动有很强的促进作用, 但对其生物量的影响存在争议; (4) 氮沉降能够影响植物生产力、根的生长, 其效应主要受到水的调节作用; (5) 氮沉降能够降低本地种的物种丰富度, 有利于外来 1 年生物种的入侵。

关键词:干旱地区; 氮沉降; 氮循环; 微生物; 生产力

文章编号: 1000-0933(2009)07-3835-11 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Review on the ecological effects of N deposition in arid and semi-arid areas

ZHOU Xiao-Bing^{1,2}, ZHANG Yuan-Ming^{1,*}

1 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3835 ~ 3845.

Abstract: The ecological effect of atmospheric N deposition has become a hot issue along with intensive human activities and global climatic change. N deposition can result in a great change of ecosystem's structure and function, leading to a series of ecological effects. In this article we reviewed the ecological consequence of N deposition in arid and semi-arid ecosystem as follow: (1) the characteristic of N deposition in arid and semi-arid area is that the nitrogen enters into the N cycle in a form of pulse, impacting other ecological processes. (2) N deposition can increase the mineralization of organic nitrogen and the content of inorganic N in the soil. N cycle can also be affected by other factors. (3) N deposition has a positive effect on the metabolic activity of microbe in soil, and there are still some argues on the effect on microbial biomass. (4) N deposition can influence plant productivity, root growth, although these effects are also regulated by water availability. (5) N deposition can reduce the abundance of endemic species and is benefit to the invasion of exotic species.

Key Words: arid area; N deposition; N cycle; microbe; productivity

全球变化是指由于自然和人为因素造成的全球性环境变化, 包括全球变暖、大气 CO₂ 浓度升高、氮沉降增加、干扰增强、外来种入侵、干旱化现象、空气污染等许多方面^[1]。全球变化能产生一系列生态后果, 直接影响人类的生存与发展^[2~5]。近年来, 在 CO₂ 浓度升高、气候变暖、生物入侵等全球变化现象受到重视的同时^[6~8], 大气氮沉降对生态系统结构和功能的影响, 所带来的生态效应逐渐成为人们研究的焦点^[9~12]。国内外学者对此进行了许多综述研究^[9,13~16], 但是这些工作大都来自氮沉降较高的区域, 而专门针对受水分和氮

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-336); 国家自然科学基金资助项目 (40771114)

收稿日期: 2008-04-10; 修订日期: 2008-10-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

素营养限制的干旱半干旱地区的氮沉降效应尚缺乏深入的研究。全球干旱半干旱地区约占陆地面积 1/3, 水分是控制干旱半干旱地区生物过程的一个主要因素, 尤其是最近几十年, 干旱化趋势明显加强, 水分限制更加突出。受水分限制的同时, 由于土壤氮素含量较低, 氮沉降增加引起氮等营养元素的变化能够影响干旱半干旱地区生态系统的生产力。本文对全球氮沉降的基本概况、干旱半干旱地区氮沉降的特点、干旱和半干旱地区氮沉降对土壤氮过程、微生物、植物生长和多样性变化的影响进行论述, 旨在为全面深入地研究干旱半干旱地区氮沉降及其生态效应提供参考。

1 氮沉降的基本概况

氮沉降 (nitrogen deposition) 是指由于自然或人为的原因改变了氮素循环, 排放到大气的大量含氮化合物经过物理和化学的变化而重新进入生态系统的过程。氮沉降包括干沉降和湿沉降两种, 干沉降通常是指含氮化合物覆于植物或土壤表面, 其成分主要是气态氮 (NO , N_2O , NH_3 等) 或含氮颗粒。湿沉降主要在降雨 (雪) 时发生, 大部分是 HNO_3 , 还有一些 NH_4^+ 和可溶性有机氮^[13,17-19]。

工业革命以来, 全球范围内通过工业固氮、农作物生长和化石燃料的燃烧所形成的活性氮 (reactive N, 具生物、光化学、辐射活性) 从 15 Tg a^{-1} 提高到 2000 年的 165 Tg a^{-1} ^[15,20], 这些氮化物的大量排放造成氮沉降的大幅增加^[21,22]。到 2000 年时, 陆地总的氮沉降达到 $25 \sim 40 \text{ Tg a}^{-1}$, 并且有逐渐增加的趋势。根据各种模型模拟, 到 2100 年, 氮沉降有可能达到 $60 \sim 80 \text{ Tg a}^{-1}$ 。这样就有更多区域的平均氮沉降速率超过 $1 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 超出了这些区域的最大氮承受能力, 带来生态系统一系列结构和功能的改变。目前, 全球氮沉降最高的三大区域是欧洲、北美、亚洲, 其氮沉降速率分别是 0.28 、 0.21 、 $0.16 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中亚洲有可能成为未来氮排放和氮沉降增加最快的区域, 到 2100 年时, 大约能占到全球总氮沉降的 50%^[17]。

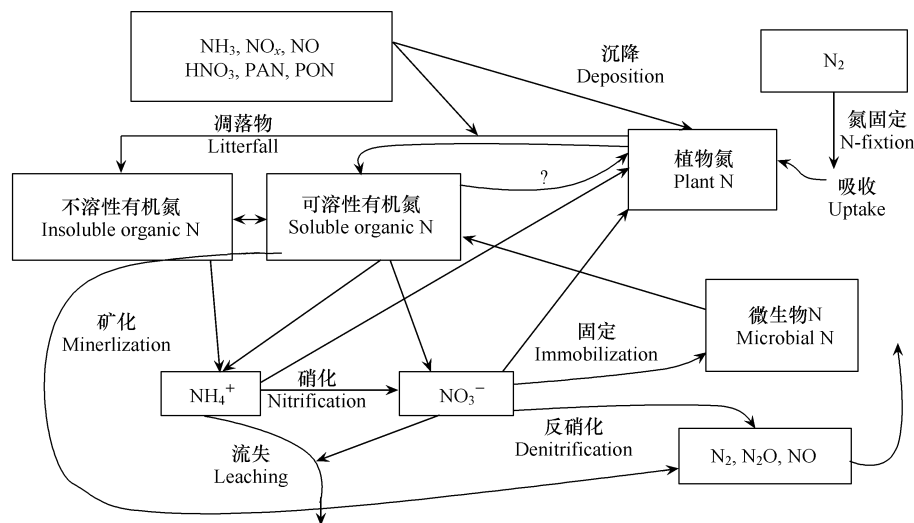
在许多干旱半干旱地区 (如美国加州部分地区), 人类活动带来的氮沉降开始成为主要的氮输入方式^[13], 莫哈韦 (Mojave) 沙漠部分区域的氮沉降达到 $3.23 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 显著影响了当地的 1 年生植物^[23]。总之, 在部分干旱半干旱地区的生态系统, 氮沉降带来的效应开始受到人们越来越多的关注^[24-28]。

2 干旱半干旱地区氮沉降的特点

在干旱半干旱地区的生态系统, 氮的输入通常是以脉冲 (pulse) 的形式进入土壤, 这种形式最大的特点就是伴随着降水 (雪)、降雾等形式而形成短时期充足的营养供给。这些脉冲营养大部分的去向为植物吸收、微生物固定和土壤下渗 (图 1)。经过一段较长时间的干旱, 水分的输入能够刺激含氮有机质的矿化^[29], 因沉降而附于叶或地面的氮变成了植物可以利用的营养成分^[11,13]。由于流向植物根的可利用氮增多, 为植物利用氮素提供了更多的机会。因此, 在这种环境中, 能够迅速获得氮素营养的植物将有利于其生存和生长, 获得竞争优势^[30], 但是这种氮脉冲持续时间短, 且降水的发生具有很大的随机性^[31]。由于植物本身各个阶段的营养需求不同, 因此, 其生命活动与这种随机形式的氮脉冲可能存在异时性^[10]。有的植物能够在生长季的早期获得这种脉冲形式的氮, 而有的植物是在生长季的其它时期获取^[32-34]。干旱半干旱地区的植物对这种氮脉冲多样化的响应, 会直接影响到物种生长、存活和竞争能力。尽管如此, 干旱环境下植物利用氮脉冲的机制到目前为止尚缺乏深入的研究^[30]。因此, 研究干旱半干旱地区氮脉冲的变化规律, 以及植物、微生物对这些变化的响应机理, 将有助于进一步研究脉冲驱动系统中物种的竞争关系和多样性维持机制^[30], 更好地反映干旱半干旱地区的氮输入对生态系统结构和功能的影响。

3 氮沉降对土壤氮循环的影响

土壤氮循环是陆地生态系统中非常重要的营养循环^[35], 氮循环的改变将会对植物营养吸收、微生物活动以及其它生态过程产生很大的影响 (图 1)。近几十年来, 随着氮化物的加速排放, 沉降在植物冠层和土壤表面的氮素大量增加。这些氮素经过一系列化学转换, 产生大量可利用的氮 (NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)^[36], 促进了土壤的氮循环过程。因此, 大部分研究都表明土壤氮的矿化速率和硝化速率在土壤氮饱和之前都会随着氮输入量的增加而增加^[3]。利用模拟研究也进一步证实大气氮沉降能明显的改变生态系统的氮的储存和循环^[10]。一般来说, 在干旱和半干旱的沙漠地区, 土壤氮素的浓度要远低于周围的居民区、农业区、道路等区域, 因此沙

图1 氮循环的精细过程 (Fisher and binkly, 2000^[39])Fig. 1 Detailed N cycle (Fisher and binkly, 2000^[39])

漠土壤氮素含量将会受到周边地区氮输入的影响。有研究表明,美国亚利桑那州城市化和农业发展能造成无机氮积累平均达 7.23 g m^{-2} ,而这种高氮输入影响到了附近的莫哈韦沙漠,其沙漠地区含氮量达到 3.23 g m^{-2} ,远远高于自然状态时的含氮水平。实验室研究也发现,沙漠中的氮矿化作用增强^[37]。对半干旱地区灌木群落土壤研究同样发现,增氮处理 1a 后,在氮增加区域 0 ~ 10cm 土壤的矿化度增加,有更多的无机氮生成^[10]。这与森林等生态系统的长期氮沉降能够增加土壤矿化速度,增加分解过程中氮的释放的研究结果相吻合^[38]。

虽然大部分研究表明氮沉降能够增加土壤的含氮量,但是可能也会由于氮的挥发,以及植物、微生物等对氮的吸收和利用(图 1),使得土壤中的氮含量保持一个相对稳定状态,而不会出现明显的增加^[40]。有研究表明,荒漠生态系统通过反硝化作用而损失氮的速率很快,有可能是因为荒漠地区降水造成了类似湿地低氧条件,而这种低氧条件促进了反硝化作用^[41]。因此,氮的矿化、硝化作用和反硝化作用及氮其它方式的流失之共同组成了氮的转化平衡,这个平衡与水分、氮沉降等多个因素密切相关^[9]。另外,即使氮沉降的量很大,也有可能以不同的无机氮形式出现。16a 的研究发现:赤华胡安(Chihuahuan)沙漠以 NH_4^+ -N 的形式沉降(57.2%)为主,而在新墨西哥州,1989 年后的 10a 间,硝态氮沉降量是铵态氮的 3 倍^[13]。由于这些氮输入形式的不同,使得土壤氮素转化和利用过程也不同,进而影响到植物、微生物等对氮的响应过程^[42]。

由于氮循环在时间和空间的动态变化,氮循环能够随温度、湿度、干扰、甚至演替阶段的变化而变化,人们对氮循环的许多过程还未确定^[43]。在森林生态系统中对土壤氮循环及其氮输入的响应进行了较多研究,一些学者也进行了相关综述^[9,15]。但是干旱半干旱地区由于其降水、土壤发育程度等条件的不同,其土壤氮的过程必然也呈现多样化的特点,并有区别于其它生态系统的特征。从上面的分析可以看出,对干旱和半干旱氮输入及其土壤氮循环过程的研究还很少,而且这些过程很大程度上受到水的影响^[44],今后应加强整个氮循环过程及相关机理的研究。

4 氮沉降对土壤微生物的影响

氮输入的增加改变了土壤的氮循环过程,由于凋落物的分解、硝化与反硝化作用等地下生态过程都有微生物的参与,而微生物的数量、活动和群落结构都受到氮输入增加的影响,微生物也会对氮的增加产生一系列的响应,因此土壤微生物在氮素循环过程中发挥着重要作用。

干旱和半干旱生态系统的生化循环依赖于土壤微生物利用营养脉冲的能力,降水的发生能够提供给土壤微生物能量和营养(C 和 N),使它们在短期内具有较高的生命活力^[45]。在赤华胡安沙漠进行水分和不同浓

度的氮增加实验表明,微生物对水分和氮增加表现出快速的响应。当进行低氮(5 g m^{-2})增加时,土壤微生物量碳、氮(指土壤微生物体中所固定的碳、氮,是土壤微生物数量的反映)增加,只是这种增加与对照和单独的增水处理的结果相比未表现出显著差异,且持续时间不长。当进行大量的氮增加(50 g m^{-2})后发现,氮处理显著增加了微生物量碳、氮的矿化^[25]。这可能是因为土壤氮浓度较低,微生物量增加受到氮的限制,氮增加后能够解除这一限制,加速有机质的分解,使得土壤微生物量增加。

干旱的科罗拉多(Colorado)高原,在优势植物空隙处增加可利用碳和氮的量,可利用碳的增加促进了土壤微生物的代谢活动和氮循环,微生物的呼吸作用和氮的固定速率都增加,而土壤对氮的增加表现为土壤 NO_3^- 的积累。与微生物代谢活动的响应不同,微生物量氮对土壤可利用碳或氮的增加没有响应。这种结果表明微生物的代谢活动(呼吸作用)相对其本身群体的大小(微生物量),可能在无机氮和可利用有机氮的短期动态的调控上发挥更重要作用^[45]。这与部分森林生态系统的的结果不同,瑞士 Scots pine 林中 3 个月氮(NH_4NO_3)的增加能够显著降低微生物量^[46],Harvard 森林氮的长期增加可以降低微生物量碳和微生物的活动^[47]。造成这种不同结果可能是由于土壤环境(如土壤 pH,水分含量等)差异等其它因素所致^[48]。总之,氮增加可以改变土壤微生物与植物营养分配,直接或间接的影响微生物生长、活动与群落组成^[16,49]。

5 氮沉降对植物生长的影响

干旱和半干旱地区,因具有较低的年平均降水量和土壤氮浓度,初级生产力因此受到水分和氮素影响。尤其是氮能够控制干旱生态系统中植物的生长,最大程度地促进植物初级生产力^[50,51]。大量研究表明,大气氮沉降能促进光合作用、刺激植物生长^[52~55]。

5.1 对植物生产力的影响

氮沉降对森林生态系统生产力的影响还存在很大的争议,有学者认为氮沉降可增加森林生态系统生产力,另一些却认为无影响^[56,57]。同样氮沉降对于干旱半干旱地区生产力的影响由于水分条件的不同可能也有不同的结果。

利用模型来模拟半干旱生态系统表明:如果在水分充足条件下,氮输入能促进生态系统的生产力;如果水分不足,生产力不会随氮的增加而改变,而在氮比较丰富的热带地区,生产力还有可能降低^[58]。因此,研究干旱半干旱地区生产力受氮素影响时必须考虑到水分状况。由于水分条件的不同,Fisher 等^[59]在赤华胡安沙漠进行水分增加和氮增加的研究,结果表明氮能够大幅增加地上生物量,而 Lajtha 等^[60]在同一地点进行氮增加后发现氮增加对初级生产力没有影响。Barker 等^[61]对荒漠灌木 *Larrea tridentata* 进行加氮、加水及同时加氮加水研究发现,在夏天,进行加水和同时加氮加水这两种处理的植物比对照和单独加氮处理的植物有更高的 CO_2 固定速率、气孔导度和比叶面积,表明夏季降水相对于氮沉降的增加可能对该植物的影响更大。而对赤华胡安沙漠的 1 年生植物研究表明,第一年增加供水,因为没有受到氮素限制,可以增加植物的生物量,而第二年却因为缺乏氮素而使植物生长受到限制^[62]。因此,在干旱半干旱等氮素含量较低地区,水分增加会促进生态系统生产力,而且在一个短的时期内这种促进作用可能比直接加氮的促进作用更明显。但长期增水会因为氮素的限制而对生态系统的生产力促进作用有限,氮沉降所带来的氮素的输入能够解除这种限制。氮沉降的增加能够刺激氮的吸收和地上氮的储藏,增加植物氮的浓度与氮的含量。叶片氮的含量增加能够促进光合作用,从而促进生产力的增长。有研究表明,干旱季节氮的输入可以显著增加一些干旱系统中植物组织氮的浓度,降低 C:N 值^[10],预计这种长期作用将会对生产力产生很大的影响。

研究还发现,不同类型的物种可能对氮沉降的响应不同。在赤华胡安沙漠长期的增氮实验表明:在草本植物最丰富时的夏季,施氮区域的盖度比对照地要高 30%,而在豆科植物最丰富的春季,施氮区域豆科植物的盖度却比对照降低了 52%。短期的一季增肥实验中,美国西部牧草 blue grama 地上体积和生物量增加,而 black grama 却没有相应的变化^[27]。在莫哈韦沙漠的增氮处理发现,外来 1 年生物种密度、生物量将会比当地 1 年生物种增加显著^[23]。同样,在一个灌木为主的生态系统进行增氮实验表明:外来 1 年生草本的生产力增加,而且这种效果在湿润年份尤其明显,但是灌木即使在 $60 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的氮增加处理 8a 后,其生物量却没有

增长^[13]。

因此,由于水分条件、物种类型和氮的作用时间长短的不同,植物对氮沉降的响应也会表现出较大的差异,各类物种的生产力也会随之发生不同的变化。

5.2 对植物根生长的影响

在沙地进行氮增加(一次施入 $N\ 50\ g\ m^{-2}$) 的实验表明:4 个月后受试植物根长显著增加,说明在半干旱环境,沙地的地下生态过程是受到氮可利用大小的限制^[25]。其它一些研究报道也表明,在干旱半干旱地区氮的增加有助于根更快速地生长^[63~66]。根伸长长度、新根生长速率、单位根的氮吸收量等与植株氮获取能力具有很大关系^[67]。根生长越快,其氮的获取能力越强,获得的氮反过来又促进了根的生长,从而使植物的竞争能力大大提高。

然而氮对根生长的影响还存在很大的争议。Fisher 等^[59]报道氮增加对赤华胡安沙漠中小灌木细根的生长无影响。Fenn 等^[13]研究表明:陆地生态系统中氮增加可以增加叶的生长,但是随着氮沉降增加,地下细根生物量和碳的生物量分配都降低。对一种 1 年生植物(*Ambrosia artemisiifolia*)模拟氮沉降研究显示,增加氮可以增加种子、茎和根的产量,然而其根茎比却降低^[12]。以上氮的增加对根促进和限制两种不同的结果,有可能是因为水分发挥了非常重要的调节作用。因为当水分充足时,氮能限制根的生长,而且这种结果适用于大部分干旱和半干旱生态系统^[68]。也有研究表明,森林生态系统氮的增加引起植物营养失衡,降低根系生产力^[69],但这有可能是由氮过剩所带来的负面效应所引起,与干旱半干旱地区的水分调节作用有很大不同。

还有一些研究表明,氮增加的区域其灌木植被盖度与对照地没有明显不同,而地下根却有很大的增长^[64],表明氮增加了地下生物量而没有在灌木盖度等地上部分表现出来^[70]。而 Hattenschwiler 等^[71]对森林生态系统生物量分配的研究发现:氮沉降增加时,根的生物量没有发生大的改变,叶生物量比(LMR)和叶面积比率(LAR)却有明显的增加。这样,氮沉降通过对植物地上部位和地下根的不同作用而使得生物量在地上地下部分得到了重新的分配,而这一分配的变化是否会对群落的结构和功能产生影响还有待于进一步研究。

通过氮沉降对植物地上和地下部分影响的分析可以看出,干旱半干旱地区植物的生长在受到氮和水的双重限制,这也是其区别于其它生态系统对氮沉降响应的主要方面。

6 氮沉降对植物物种多样性的影响

多数研究表明,由大气氮沉降带来的氮可以增加植物生物量,改变植物群落组成,增加外来物种的入侵,降低植物多样性^[21,72~74]。在干旱半干旱地区,氮的增加可以降低当地物种丰富度,减少多年生和 1 年生植物的生产力^[75,76],从而为外来物种的入侵创造有利条件^[23,29,77]。在那些外来物种较少的干旱和半干旱地区,可能是由于许多入侵种受到当地低的氮素营养条件和水分的限制而不能成功入侵。而在氮浓度比较低的沙漠等地区,相对少量氮的增长可能解除这些限制,使得当地植物的生长格局发生大的变化,也有利于外来物种的成功入侵,导致植物群落明显改变。因此,在这些氮限制的区域中,由氮增加引起的植物群落的改变要比其它高等植物生态系统要大许多^[23,38]。对于氮沉降带来的可利用氮素的增加,不同类型的植物可能具有不同的响应特点,以下分别就 1 年生植物和多年生灌木随氮的增加其竞争关系的改变,以及通过动物啃食行为的改变对植被动态的间接影响进行论述。

6.1 对 1 年生植物的影响

对莫哈韦沙漠地区 1 年生外来物种的研究表明,氮的增加能够提高其生物量^[38,78,79]。由于植物生物量和多产是相关的^[80],预示着外来种可能有更高的种子产量,这又大大加强了其扩散与入侵能力。造成外来物种的优势地位,可能是由于外来物种对土壤氮增加的响应比当地物种要敏感,吸收土壤氮的速度比当地植物要快^[81]。外来物种密度和生物量的增加,可能大大提高其竞争土壤养分和水分的的能力,而且这些入侵植物在物候上普遍比当地植物要早,能够限制当地植物的生长^[82],降低当地 1 年生植物的密度、生物量、多样性。然而,不同的外来 1 年生植物因为具有不同的生活史特征,随着氮的增加而呈现不同的响应特点^[83,84],这些也有可能影响到其多样性的变化。

在荒漠地区,有的外来物种萌发时没有严格的资源需求,对水分要求也比当地物种低^[85~87]。经过两年的氮的增加试验,可以发现当地物种密度和生物量的变化远远比外来 1 年生植物强烈^[23]。因此,对于增加土壤氮水平只有在水分条件较充足的年份影响植物^[87,88]。这一被普遍认同的观点,可能适合当地 1 年生植物生长状况,而对于外来 1 年生植物来说,其水分的影响要小得多^[23]。

6.2 对多年生植物的影响

在 20 世纪 70 年代,加州南部以灌木为优势的生态系统(CSS)退化(当地灌木消失),当时认为可能与高浓度的大气氧化物(包括臭氧和含氮物质)有很大的关系。然而进一步的研究表明,空气中的含氮物质可能是造成这种结果的原因^[13,24,89],因此氮沉降的增加对多年生植物也会带来很大影响,造成植物群落结构变化。Stursova 等^[11]的研究结果表明,在退化的 CSS 生态系统,氮能够沉积在土壤浅层,增加的水分和氮浓度有利于物候较早的外来物种,使当地灌木幼苗的建成降低,同时限制成熟灌木的生长,这些变化可能导致 CSS 大大退化。

氮沉降的增加带来生物入侵的同时,又能间接改变火干扰的频率和植物群落演替过程,从而改变物种多样性。莫哈韦沙漠氮沉降增加后,外来入侵草本增多,火的干扰变得更加频繁^[83]。由于许多沙漠灌木物种很难适应火的干扰,灌木为优势的群落逐渐向 1 年生植物群落转化^[13]。

6.3 对动物啃食行为的影响

氮沉降能通过动物啃食行为的变化来间接影响植物多样性。增加氮有可能会增加昆虫、大型动物等对植物的啃食作用,因为高营养的植物对这些啃食者更具吸收力。氮增加后,鼠类对 1 年生植物群落的干扰^[90],以及冬季叉角羚在阿尔伯达的分布^[91]都会受到很大的影响,昆虫也会由于取食的变化对 1 年生植物的生产和分配产生显著影响^[12]。总之,啃食会改变微气候、植物生长格局和群层结构,从而使得竞争关系随氮素营养的改变而变化^[43],进而影响到植物的物种多样性组成。

除啃食以外,李德军等人^[14]还总结了氮沉降对木本植物的抗寒力和抗病虫害能力的影响,这些能力的变化都有可能影响当地的物种多样性。

7 中国干旱半干旱地区氮沉降研究展望

国外对氮沉降的研究较早,也从不同角度进行了综述。对干旱和半干旱地区的沙漠、草地、森林生态系统也陆续有氮沉降的长期观测和实验的研究报道^[11,13,27,28,44,77,92]。在中国,随着对氮沉降的认识深入,也开始有一些氮沉降长期监测数据的报道^[27],并对氮沉降可能带来的效应进行了大量的研究^[15,93~96]。但这些都集中在森林地区,对干旱半干旱地区研究进行较少。结合国内外的一些研究,中国的干旱半干旱地区应注重开展以下研究。

7.1 建立长期的大气氮沉降的监测网络

中国对大气氮沉降的研究总的来说起步较晚、研究较少,也未形成比较完整和合理的氮沉降监测网络,相比北美国家大气沉降项目(NADP/NTN)和欧洲的监测评价项目(EMEP)等要滞后许多^[15],对西北干旱半干旱地区氮沉降的监测和研究更是缺乏。随着工农业的发展、西部大开发的深入和人类干扰的加剧,氮沉降可能成为影响该地区生态系统的重要因子。总的来说,这一地区是氮沉降较低的区域,也是临界负荷较低的区域($<1.0\text{ g m}^{-2}\text{ a}^{-1}$)^[19],氮输入的增加有可能对生态系统带来大的改变。因此,建立合理的监测网络显得尤为必要,此外,对干旱半干旱地区氮沉降的长期监测也有利于人们制定合理的计划,为政府相应的决策提供重要依据。

7.2 植物、微生物对氮沉降的响应研究

中国的氮沉降量,自东向西依次减少,有关干旱半干旱地区氮沉降的系统研究还未见报道。植物和微生物是生态系统中对氮沉降响应比较明显的两大主体,因此对其响应氮沉降的研究显得尤为重要。国内就植物、微生物等对模拟氮沉降响应的研究集中于氮沉降较高的亚热带地区^[49,93,95,97],在鼎湖山也建立了永久样地。中国的干旱半干旱地区分布有草原及荒漠等典型生态系统,植物、微生物对氮沉降的响应变化能够影响

这些生态系统的生产力水平。氮沉降的长期作用可能影响到该地区植物群落的结构和功能,因此对该区域植物尤其是优势植物对氮沉降响应的研究显得非常重要。在古尔班通古特沙漠等地,分布有大量的1年生植物,是荒漠地区生产力的重要组成部分,研究表明,1年生植物(包括短命植物)可能对氮的响应比较敏感^[12],该地区可利用氮的时空变化对这些植物生产力、生理生态、繁殖分配等的影响值得关注。而微生物在改变土壤结构,土壤营养的转化上发挥着极其重要的作用,是生物地球化学循环中最核心的生命组分,其变化也关系到干旱半干旱地区土壤氮素的循环,植被的营养吸收等。因此,对这两大主体的研究,将有助于全面了解氮沉降对干旱半干旱地区的影响。

7.3 氮沉降与生物结皮、豆科植物的整合研究

干旱和半干旱地区,存在大量的生物结皮,它们可能是最重要的固氮成分^[40],有研究表明,生物结皮的固氮成为某些地区主要氮输入方式^[98]。在中国的古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠等地区,存在有大量的生物结皮(细菌,真菌,苔藓,地衣等)^[99-101],国内外对生物结皮的氮固定也进行了大量研究工作^[102-104]。在氮沉降比较低的区域,氮沉降的效应是一个长期过程,对植物生长影响也可能较慢,但是一些敏感成分可能受到很大的影响^[13]。有研究表明苔藓、地衣等因为没有表皮的保护,易受氮的毒害,因此氮沉降有可能限制生物结皮的生长^[105],从而影响到氮循环过程。

我国的干旱半干旱地区,还分布有大量的豆科植物。一些典型的温带属,分布于我国西北干旱草原区,还有一些古地中海成分,出现在干旱荒漠及草原上。豆科植物能与根瘤菌共生固氮,提高生产力。但与结皮一样,豆科植物对氮的影响可能比较敏感,相关研究表明增施氮肥能除去草地群落中许多豆科植物,而其它一些非豆科植物种类却增加^[27,43],但是氮沉降对豆科植物的影响机理还未见专门的研究报道。

虽然目前对生物结皮、豆科植物与氮沉降的相互作用还未进行系统研究,但是它们的变化会影响到干旱半干旱地区的氮素营养和生态系统的生产力水平。氮沉降输入土壤中的氮与生物结皮、豆科植物等固定的氮在干旱半干旱地区氮循环中的作用以及对生态系统的相关效应,有待于我们进一步长期观测和实验研究。

7.4 与其它全球变化因子相耦合研究

氮沉降增加仅仅是全球变化影响干旱半干旱地区生态系统的一个重要因子,利用增氮实验来模拟长期低速的氮沉降是很有效的方式,尽管效果可能有所不同,但其趋势是相似的^[27]。与其它生态系统一样,干旱半干旱地区的生态系统在全球变化中并不只受单因素的影响,CO₂增加、温度上升、干扰变化等都会对这些生态系统造成很大的影响,而目前对于这些因子综合效应的研究,国内报道较少。因此,除继续利用单一控制实验来进行氮沉降的研究以外,与各种全球变化因子相结合,进行全面的试验研究,有助于我们更加深入准确的了解干旱半干旱地区生态系统对全球变化的响应特点,为全球变化可能带来的影响提供更多的证据。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2001, The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Craine J M, Reich P B, Tilman G D, *et al.* The role of plant species in biomass production and response to elevated CO₂ and N. *Ecology Letters*, 2003, 6(7): 623-630.
- [3] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems-Hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [4] Hyvonen R, Agren G I, Linder S, *et al.* The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist*, 2007, 173(3): 463-480.
- [5] Schroter D, Cramer W, Leemans R, *et al.* Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752): 1333-1337.
- [6] Ward J K, Strain B R. Elevated CO₂ studies: past, present and future. *Tree Physiology*, 1999, 19(4-5): 211-220.
- [7] Walker M D, Wahren C H, Hollister R D, *et al.* Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(5): 1342-1346.
- [8] Dukes J S, Mooney H A. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(4): 135-139.
- [9] Fang Y T, Mo J M, PerGundersen, *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and its responses to atmospheric nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1523-1531.

- [10] Vourlitis G L, Pasquini S, Zorba G. Plant and soil N response of southern californian semi-arid shrublands after 1 year of experimental N deposition. *Ecosystems*, 2007, 10(2): 263–279.
- [11] Stursova M, Crenshaw C L, Sinsabaugh R L. Microbial responses to long-term N deposition in a semiarid grassland. *Microbial Ecology*, 2006, 51(1): 90–98.
- [12] Throop H L. Nitrogen deposition and herbivory affect biomass production and allocation in an annual plant. *Oikos*, 2005, 111(1): 91–100.
- [13] Fenn M E, Baron J S, Allen E B, *et al.* Ecological effects of nitrogen deposition in the western United States. *Bioscience*, 2003, 53(4): 404–420.
- [14] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al.* Ecophysiological Responses of Woody Plants to Elevated Nitrogen Deposition. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(5): 482–488.
- [15] Lü C Q, Tian H Q, Huang Y. Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 205–218.
- [16] Zhang N L, Guo J X, Wang X Y, *et al.* Soil microbial feedbacks to climate warming and atmospheric N deposition. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 252–261.
- [17] Lamarque J F, Kiehl J, Brasseur G, *et al.* Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multi-model approach. Part 1: Analysis of nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D19): 21.
- [18] Huang M Y, Xiao L H. Effect of increased deposition of atmospheric nitrogen on forest nutrition and susceptibility to stress. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 1997, 13(2): 34–36.
- [19] Wang Q H, Gong Y B, Zhang J. Impact of forest ecosystems on atmospheric nitrogen deposition. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2006, 27(1): 19–25.
- [20] Galloway J N, Aber J D, Erisman J, *et al.* The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 2003, 53(4): 341–356.
- [21] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737–750.
- [22] Holland E A, Braswell B H, Lamarque J F, *et al.* Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(15): 849–815.
- [23] Brooks M L. Effects of increased soil nitrogen on the dominance of alien annual plants in the Mojave Desert. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(2): 344–353.
- [24] Allen E B, Padgett P E, Bytnerowicz A, *et al.* Nitrogen deposition effects on coastal sage vegetation of southern California. *Ecosystems*, 1996, 1: 131–139.
- [25] Zhang Q H, Zak J C. Effects of water and nitrogen amendment on soil microbial biomass and fine root production in a semi-arid environment in West Texas. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(1): 39–45.
- [26] Bennett L T, Adams M A. Response of a perennial grassland to nitrogen and phosphorus additions in sub-tropical, semi-arid Australia. *Journal of Arid Environments*, 2001, 48(3): 289–308.
- [27] Baez S, Fargione J, Moore D I, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in the northern Chihuahuan desert: Temporal trends and potential consequences. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(4): 640–651.
- [28] Gelfand I, Yakir D. Influence of nitrite accumulation in association with seasonal patterns and mineralization of soil nitrogen in a semi-arid pine forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(2): 415–424.
- [29] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221–235.
- [30] James J J, Richards J H. Plant nitrogen capture in pulse-driven systems: interactions between root responses and soil processes. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 765–777.
- [31] Noy-Meir I. Desert Ecosystems: Environment and Producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 25–51.
- [32] James J J, Richards J H. Plant N capture from pulses: effects of pulse size, growth rate, and other soil resources. *Oecologia*, 2005, 145: 113–122.
- [33] Gebauer R L E, Ehleringer J R. Water and nitrogen uptake patterns following moisture pulses in a cold desert community. *Ecology*, 2000, 81: 1415–1425.
- [34] Bilbrough C J, Caldwell M M. Exploitation of springtime ephemeral N pulses by six Great Basin plant species. *Ecology*, 1997, 78: 231–243.
- [35] Xie G H, Steinberger Y. Nitrogen and carbon dynamics under the canopy of sand dune shrubs in a desert ecosystem. *Arid Land Research and Management*, 2005, 19(2): 147–160.
- [36] Welter J R, Fisher S G, Grimm N B. Nitrogen transport and retention in an arid land watershed: Influence of storm characteristics on terrestrial-aquatic linkages. *Biogeochemistry*, 2005, 76(3): 421–440.
- [37] Zhu W X, Hope D, Gries C, *et al.* Soil characteristics and the accumulation of inorganic nitrogen in an arid urban ecosystem. *Ecosystems*, 2006, 9(5): 711–724.
- [38] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, *et al.* Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems. *BioScience*, 1989, 39(6): 378–386.
- [39] Fisher R F, Binkley D. *Ecology and management of forest soils*, 3rd edn. New York: Wiley, 2000.

- [40] Peterjohn W T, Schlesinger W H. Nitrogen loss from deserts in the southwestern United States. *Biogeochemistry*, 1990, 10(1): 67—79.
- [41] Peterjohn W T. Factors controlling denitrification in a Chihuahuan desert ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1694—1701.
- [42] Leith I D, Sheppard L J, Pitcairn C E R, *et al.* Comparison of the effects of wet N deposition (NH_4Cl) and dry N deposition (NH_3) on UK moorland species. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, 130(1-4): 1043—1048.
- [43] Adams M B. Ecological issues related to N deposition to natural ecosystems: research needs. *Environment International*, 2003, 29(2-3): 189—199.
- [44] Ford D J, Cookson W R, Adams M A, *et al.* Role of soil drying in nitrogen mineralization and microbial community function in semi-arid grasslands of north-west Australia. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7): 1557—1569.
- [45] Schaeffer S M, Evans R D. Pulse additions of soil carbon and nitrogen affect soil nitrogen dynamics in an arid Colorado Plateau shrubland. *Oecologia*, 2005, 145(3): 425—433.
- [46] Soderstrom B, Baath E, Lundgren B. Decrease in soil microbial activity and biomass owing to nitrogen amendments. *Canadian Journal of Microbiology*, 1983, 29: 1500—1506.
- [47] Compton J E, Watrud L S, Porteous L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 143—158.
- [48] Zhou J, Lei T. Review and prospects on methodology and affecting factors of soil microbial diversity. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 306—311.
- [49] Xue J H, Mo J M, Li J, *et al.* The short-term response of soil microorganism number to simulated nitrogen deposition. *Guizhou*, 2007, 27(2): 174—179.
- [50] Hooper D U, Johnson L. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: Responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1): 247—293.
- [51] James D W, Jurinak J J. Nitrogen fertilization of dominant plants in the northeastern Great Basin Desert. *Nitrogen in Desert Ecosystems*, 1979: 219—231.
- [52] Field C B, Chapin F S, Matson P A, *et al.* Responses of Terrestrial Ecosystems to the Changing Atmosphere — a Resource-Based Approach. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23: 201—235.
- [53] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, *et al.* Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915—917.
- [54] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, *et al.* Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings. *Trees-Structure and Function*, 2001, 15(8): 453—461.
- [55] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 876—882.
- [56] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, *et al.* The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 848—850.
- [57] Currie W S, Nadelhoffer K J. Dynamic redistribution of isotopically labeled cohorts of nitrogen inputs in two temperate forests. *Ecosystems*, 1999, 2(1): 4—18.
- [58] Asner G P, Townsend A R, Riley W J, *et al.* Physical and biogeochemical controls over terrestrial ecosystem responses to nitrogen deposition. *Biogeochemistry*, 2001, 54(1): 1—39.
- [59] Fisher F M, Zak J C, Cunningham G L, *et al.* Water and nitrogen effects on growth and allocation patterns of creosotebush in the northern Chihuahuan Desert. *Journal of Range Management*, 1988, 41: 387—391.
- [60] Lajtha K, Schlesinger W H. Plant response to variations in nitrogen availability in a desert shrubland community. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 29—37.
- [61] Barker D H, Vanier C, Naumburg E, *et al.* Enhanced monsoon precipitation and nitrogen deposition affect leaf traits and photosynthesis differently in spring and summer in the desert shrub *Larrea tridentata*. *New Phytologist*, 2006, 169(4): 799—808.
- [62] Gutierrez J R, Whitford W G. Chihuahuan Desert Annuals: Importance of Water and Nitrogen. *Ecology*, 1987, 68(6): 2032—2045.
- [63] Gross K L, Peters A, Pregitzer K S. Fine root growth and demographic response to nutrient patches in 4 old field plant species. *Oecologia*, 1993, 95(1): 61—64.
- [64] Jackson R B, Caldwell M M. The timing and degree of root proliferation in fertile-soil microsites for three cold-desert perennials. *Oecologia*, 1989, 81(2): 149—153.
- [65] Hodge A, Stewart J, Robinson D, *et al.* Spatial and physical heterogeneity of N supply from soil does not influence N capture by two grass species. *Functional Ecology*, 2000, 14(5): 645—653.
- [66] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9—24.
- [67] Barber S A. *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. New York: Wiley, 1995.
- [68] West N E. In: Skujins, J. *Semiarid Lands and Deserts: Soil Resources and Reclamation*. New York: Marcel Dekker, 1991. 295—344.
- [69] Whytemare A B, Edmonds R L, Aber J D, *et al.* Influence of excess nitrogen deposition on a white spruce (*Picea glauca*) stand in southern

- Alaska. Biogeochemistry, 1997, 38(2):173—187.
- [70] Bechtold H A, Inouye R S. Distribution of carbon and nitrogen in sagebrush steppe after six years of nitrogen addition and shrub removal. Journal of Arid Environments, 2007, 71(1):122—132.
- [71] Hattenschwiler S, Körner C. Biomass allocation and canopy development in spruce model ecosystems under elevated CO₂ and increased N deposition. Oecologia, 1998, 113(1):104—114.
- [72] Bobbink R, Hornung M, Roelofs J G M. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-Natural European vegetation. Journal of Ecology, 1998, 86(5):717—738.
- [73] Inouye R S, Tilman D. Convergence and Divergence of Old-Field Vegetation After 11 years of Nitrogen Addition. Ecology, 1995, 76(6):1872—1887.
- [74] Wilson S D, Tilman D. Plant Competition and Resource Availability in Response to Disturbance and Fertilization. Ecology, 1993, 74(2):599—611.
- [75] Carpenter A T, Moore J C, Redente E F, *et al.* Plant community dynamics in a semi-arid ecosystem in relation to nutrient addition following a major disturbance. Plant and Soil, 1990, 126(1):91—99.
- [76] McLendon T, Redente E F. Nitrogen and phosphorus effects on secondary succession dynamics in a semiarid sagebrush site. Ecology, 1991, 72(6):2016—2024.
- [77] Schwinning S, Starr B I, Wojcik N J, *et al.* Effects of nitrogen deposition on an arid grassland in the Colorado Plateau cold desert. Rangeland Ecology & Management, 2005, 58(6):565—574.
- [78] Bossard C C, Randall J M, Hoshovsky M C. Invasive Plants of California's Wildlands. Berkeley: University of California Press, 2000. 72—76.
- [79] Jackson L E. Ecological Origins of California's Mediterranean Grasses. Journal of Biogeography, 1985, 12(4):349—361.
- [80] Cousens R, Mortimer M. Dynamics of Weed Populations. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [81] Yoshida L C, Allen E B. ¹⁵N uptake by mycorrhizal native and invasive plants from a N-eutrophied shrubland: a greenhouse experiment. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(4):243—248.
- [82] Chiariello N R. Phenology of California grasslands. Grassland structure and function: California annual grassland. Kluwer, Dordrecht, 1989:47—58.
- [83] Brooks M L. Habitat Invasibility and Dominance by Alien Annual Plants in the Western Mojave Desert. Biological Invasions, 1999, 1(4):325—337.
- [84] Lodge D M. Biological invasions: Lessons for ecology. Trends in Ecology & Evolution, 1993, 8(4):133—137.
- [85] Beatley J C. Ecological Status of Introduced Brome Grasses (*Bromus* spp.) in Desert Vegetation of Southern Nevada. Ecology, 1966, 47(4):548—554.
- [86] Vidiella P E, Armesto J J. Emergence of ephemeral plant species from soil samples of the Chilean coastal desert in response to experimental irrigation. Revista Chilena de Historia Natural, 1989, 62:99—107.
- [87] Gutiérrez J R. Effects of low water supplementation and nutrient addition on the aboveground biomass production of annual plants in a Chilean coastal desert site. Oecologia, 1992, 90(4):556—559.
- [88] Romney E M, Wallace A, Hunter R B. Plant response to nitrogen fertilization in the northern Mojave Desert and its relationship to water manipulation. Nitrogen in Desert Ecosystems, 1978:232—243.
- [89] Padgett P E, Allen E B. Differential responses to nitrogen fertilization in native shrubs and exotic annuals common to Mediterranean coastal sage scrub of California. Plant Ecology, 1999, 144(1):93—101.
- [90] Hobbs R, Gulmon S, Hobbs V, *et al.* Effects of fertilizer addition and subsequent gopher disturbance on a serpentine annual grassland community. Oecologia, 1988(72):291—295.
- [91] Barrett M W. Evaluation of fertilizer on pronghorn winter range in Alberta. Journal of Range Management, 1979, 32:55—59.
- [92] Crenshaw C L, Lauber C, Sinsabaugh R L, *et al.* Fungal control of nitrous oxide production in semiarid grassland. Biogeochemistry, 2008, 87(1):17—27.
- [93] Mo J M, Xue J H, Fang Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7):1413—1420.
- [94] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, *et al.* Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in southern China. Plant and Soil, 2007, 296(1-2):125—135.
- [95] Li D J, Mo J M, Fang Y T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *schima superba* and *cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(4):543—549.
- [96] Fan H B, Liu W F, Qiu X Q, *et al.* Responses of litterfall production in Chinese fir plantation to increased nitrogen deposition. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9):1335—1338.
- [97] Li D J, Mo J M, Pen S L, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on elemental concentrations of *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9):2165—2172.
- [98] West N, Skujins J. The nitrogen cycle in North American cold-winter semi-desert ecosystems. Ecology of Plants, 1977, 12:45—53.
- [99] Li X R, Jia Y K. Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid regions. Journal of Desert Research, 2001, 21(1):4—11.

- [100] Zhang Y M, Pan H X, Pan B R. Distribution characteristics of biological crust on sand dune surface in Gurbantunggut desert, Xinjiang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 61–64.
- [101] Zhang Y M, Chen J, Wang X Q, *et al.* The distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut desert. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 53–60.
- [102] Aranibar J N, Anderson I C, Ringrose S, *et al.* Title: Importance of nitrogen fixation in soil crusts of southern African arid ecosystems: acetylene reduction and stable isotope studies. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(2): 345–358.
- [103] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128–135.
- [104] Wu N, Zhang Y M, Wang H L, *et al.* On the nitrogen fixation by biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert northern Xinjiang of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3785–3793.
- [105] Littmann T. Atmospheric input of dust and nitrogen into the Nizzana sand dune ecosystem, north-western Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36(3): 433–457.

参考文献:

- [9] 方运霆, 莫江明, PerGundersen, 等. 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.
- [14] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 木本植物对高氮沉降的生理生态响应. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(5): 482–488.
- [15] 吕超群, 田汉勋, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 205–218.
- [16] 张乃莉, 郭继勋, 王晓宇, 等. 土壤微生物对气候变暖和大气 N 沉降的响应. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 252–261.
- [18] 黄美艳, 肖辉林. 大气氮沉降的增加对森林营养和胁迫敏感性的研究. *广东林业科技*, 1997, 13(2): 34–36.
- [19] 王巧红, 宫渊波, 张君. 森林生态系统对大气氮沉降的响应. *四川林业科技*, 2006, 27(1): 19–24, 25.
- [48] 周桔, 雷霆. 土壤微生物多样性影响因素及研究方法的现状与展望. *生物多样性*, 2007, 15(3): 306–311.
- [49] 薛璟花, 莫江明, 李炯, 等. 土壤微生物数量对模拟氮沉降增加的早期响应. *广西植物*, 2007, 27(2): 174–179, 202.
- [55] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对三种亚热带树苗生长和光合作用的影响. *生态学报*, 2004, 24(5): 876–882.
- [93] 莫江明, 薛璟花, 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.
- [95] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 543–549.
- [96] 樊后保, 刘文飞, 裴秀群, 等. 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.
- [97] 李德军, 莫江明, 彭少麟, 等. 亚热带森林两种优势树种幼苗的元素含量对模拟氮沉降增加的响应. *生态学报*, 2005, 25(9): 2165–2172.
- [99] 李新荣, 贾玉奎. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 4–11.
- [100] 张元明, 潘惠霞, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 61–64.
- [101] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征. *地理学报*, 2005, 60(1): 53–60.
- [104] 吴楠, 张元明, 王红玲, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性. *生态学报*, 2007, 27(9): 3785–3793.