干旱化对樟子松固沙林氮磷循环的影响

谢 尧[1,2] 赵 琼[1*] 李炎真[1,2] 于占源[1] 林贵刚[1] 曾德慧[1]

([1]中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; [2]中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 为研究半干旱区进一步干旱化对森林生态系统氮磷循环的影响,以科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工固沙林为对象,分析了3种不同降雨量条件下(天然降雨、降雨量减少30%、降雨量减少50%)氮磷养分在一个生长季内的吸收、归还和分解释放3组流通量及其对应的流通率。结果发现,降雨减少30%处理下,樟子松对氮的归还量与归还率显著下降27.3%和37.3%,其余流通量与流通率变化不显著。降雨减少50%处理下,氮的吸收、归还与分解释放量显著下降59.9%、36.0%和50.3%,磷的归还量显著下降38.1%,氮归还与分解释放率显著下降39.9%和32.7%,而地表枯落物层中的磷含量则显著上升27.4%,磷的吸收量和氮磷吸收率变化不显著。降雨减少引起氮磷归还与分解释放率的下降,预示着干旱化导致沙地樟子松固沙林存在养分循环失衡的风险。

关键词 降雨减少; 沙地生态系统; 氮磷养分循环; 流通率; 水分胁迫

Effects of aridification on nitrogen and phosphorus cycles in a *Pinus sylvestis* var. *mongolica* sand-fixation plantation. XIE Yao[1,2], ZHAO Qiong[1*], LI Yan-zhen[1,2], YU Zhan-yuan[1], LIN Gui-gang[1], ZENG De-hui[1] ([1]*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*; [2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*).

Abstract: A field experiment with three rainfall reduction levels (natural rainfall, 30% reduction in rainfall, and 50% reduction in rainfall) was conducted in a *Pinus sylvestis* var. *mongolica* sand-fixation plantation in Keerqin Sandy Lands to investigate the effects of aridification on the nitrogen (N) and phosphorus (P) cycles. The forest ecosystem was divided into three compartments (tree, soil and aboveground litter layer). The amount and rate of N and P absorption (from soil to tree), return (from tree to litter layer) and decomposition (from litter layer to soil) were measured and calculated. The results showed that, compared with natural rainfall, 30% reduction in rainfall significantly reduced the amount and rate of N return by 27.3% and 37.3%, and did not affect N absorption and decomposition and P cycling. The 50% reduction in rainfall significantly decreased the amount of N absorption, return and decomposition by 59.9%, 36.0% and 50.3%, P return amount by 38.1%, N return and decomposition rate by 39.9% and 32.7%, increased litter P content by 27.4%, and did not affect the amount of P absorption, N and P absorption rates. The decreases in the rates of N and P return and decomposition following rainfall reduction indicated that aridification would bring the risk of nutrient imbalance to pine forest.

Key words: rainfall reduction; sandy land ecosystem; N and P nutrient cycling; flow rate; water stress.

在干旱半干旱地区,水分是植物生长发育最主要的限制因子,影响着整个生态系统的物质循环与能量流动(阎秀峰等,1999; Ain-Lhout *et al.*,2001; Weltzin *et al.*,2003;周双喜等,2010)。目前全球气候变化带来的大气环流和水文循环的改变,导致了全球范围的降雨格局变化(IPCC, 2001; Huang *et al.*,2011)。根据预测,在中纬度干旱半干旱地区,平均降水量可能会进一步减少(IPCC,2014),这一趋势将进一步加剧该区域内林木干旱胁迫问题,导致森林群落中树木的衰退乃至死亡(郭忠升等,

国家自然科学基金项目(41877341)资助。
收稿日期: 2019-04-01 接受日期: 2019-08-11
*通讯作者 E-mail: zhaoqiong@iae.ac.cn

2010;Choat *et al.*,2018)。

在森林生态系统中,降雨减少不仅会通过直接改变水分供应影响林木生长,还能通过改变养分循环间接影响林木的生长和林分的发展,这在土壤贫瘠的地区尤为重要。干旱化会影响林木对养分的吸收利用和凋落物分解。随着含水量的降低,土壤微生物活性下降,土壤氮磷矿化量也会随之减少(Stanford *et al.*,1974),而且无机氮和磷酸盐向根表的运移受到限制,导致土壤氮磷的可利用性降低(Zhao *et al.*,2008)。缺水还会导致根系对氮磷的吸收能力下降(姚剑飞等,2013),同时,干旱会使树木更易受到害虫和病原体的侵袭,进而影响土壤养分流通情况(Schlesinger *et al.*,2016)。干旱化会改变凋落物的产量与化学组成、土壤微生物量和群落结构进而影响凋落物分解及其养分释放。一般来说,面对水分胁迫时,林木会通过大量落叶以减少蒸腾作用(杨玉盛等,2004)。因此,干旱化会增加凋落物产量。但对于抗旱性较强的林木来说,凋落物产量不一定随降雨减少而增加(朱教君等,2007)。而且凋落量与生产力呈正相关,降雨减少导致植物生产力下降,凋落物产量减少(Bray *et al.*,1964;Clark *et al.*,2001)。干旱化还会影响凋落物的化学组成,从而影响其分解速度。例如,植物会通过增加木质素含量来保护叶片不受干旱胁迫,这会降低凋落物的易分解程度(Osono,2007;Erhagen *et al.*,2013)。同时,水分胁迫会导致土壤微生物量下降,酶活性减弱,凋落物分解减缓,凋落物分解过程中的氮磷释放速率降低(龙健等,2004)。尽管干旱化对森林生态系统内部养分循环过程的影响已有大量研究(He *et al.*,2014),但多专注于系统内养分循环的单一过程(李雪峰等,2007;任艳林,2012;王凯等,2018),在生态系统水平上全面量化养分在系统内的吸收、归还和分解的报道较少。

科尔沁沙地地处半干旱区,大规模的放牧、垦殖活动逐步加速其沙化过程,生态环境持续恶化(林年丰等,2001)。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)耐旱、耐贫瘠,是我国三北地区防风固沙林和水土保持林最主要的树种。自 1955 年开始,在科尔沁沙地东部广泛种植,对防风固沙效果显著。然而,自 20 世纪 90 年代初开始,辽宁等地的樟子松人工林出现了生长衰退、病虫害多发等不稳定的现象(焦树仁,2001)。由于水分和养分都是半干旱区樟子松人工林生态系统重要的限制性因子(曾德慧等,2005;Zhu *et al.*,2007),研究干旱化对半干旱区樟子松固沙林中氮磷在生态系统组分之间的流通率和流通量的变化,有助于了解半干旱区樟子松人工固沙林对环境变化的适应性机制,为环境变化条件下樟子松人工林的经营管理提供科学依据。

本研究选取半干旱区的沙地樟子松固沙林生态系统作为研究对象,根据历史降雨数据,最潮湿和最干旱年份的降雨量在过去 50 年的平均值的±30%范围内,而根据对科尔沁沙地降雨趋势的预测,未来的降雨量可能会进一步减少(张永民等,2006;刘新平等,2011)。故而本实验以自然降水作为对照,设置了降雨量降低 30%和 50%的处理,在之前类似的研究中也有设置过相同参数的报道(Fay *et al.*,2000,2008)。测定地表枯落物、土壤和林木各器官的氮磷浓度,估算生物量和凋落物量,并布置枯落物分解实验计算分解过程中的养分释放速率,最后计算林木、地表枯落物和土壤 3 个养分分室的氮磷贮量和氮磷在 3 个分室间流通量及流通率,分析降雨量减少对樟子松氮磷循环的影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站(112°24′E,42°54′N,海拔 260 m)。实验站地处科尔沁沙地东南缘,属大陆性温带半湿润、半干旱气候过渡带,年均气温 6 ℃(最低 1 月均温-16.2 ℃,最高 7 月均温 23.8 ℃),年均降水量 450 mm(其中 6—9 月降水量占全年的 70%),年蒸发量 1780 mm,无霜期 154 d。土壤类型为风沙土,0~20 cm土壤容重为 1.54 g·cm^{-3},pH 值 6.5。

1.2 样地设置

实验布置在 2003 年栽植(4 年生苗)的樟子松人工纯林内(行距 5 m,株距 2 m),树高 3.88 m,胸径 7.0 cm,地面坡度<2°,林下植被主要为狗尾草(*Setaria viridis*)、绿珠藜(*Chenopodium acuminatum*)、兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)、野大麻(*Cannabis sativa*)和芦苇(*Phragmites australis*)等。降雨处理采用单因素 3 水平的完全随机设计,3 个水平包括:对照(Control),穿透雨降雨量减少 30%(-30%)和穿透雨降雨量减少 50%(-50%)。每种处理设置 3 个重复,各处理和重复随机布置在 9 个 15 m×20 m样地。降雨处理从 2013 年 4 月开始实施。在减雨的处理中,离地面 2 m 高的位置倾斜架

设宽 20 cm 的 V 形长条的透明 PVC 挡雨板,使截留的雨水顺着凹槽流向挡雨板底端的收集管排出样地,样地中挡雨板面积比例与降雨量减少比例一致。对照样地中将挡雨板翻过来架设,密度与-30%样地一致,不设排雨管。

1.3　取样及样品分析

2018 年 4 月中旬,取地表枯落物和 0~20、20~40、40~60 cm 3 层土壤样品。地表枯落物用面积 0.25 m^2的铁圈在各样地内随机选 4 点取样,将圈内未分解和半分解的地表枯落物全部收回,烘干称重,计算现存枯落物量,然后取部分样品研磨后测定全氮和全磷浓度。土壤取样是在每个样地内用内径为 2.5 cm的土钻随机取 5 个点,按样地和土层混合后过 2 mm 筛除去细根等杂质,风干后研磨过 60 目筛用于测全氮和全磷浓度。此外,在各样地选取 3 株标准木,于 2018 年 4 月中旬与 10 月中旬测量胸径与树高,并取其不同器官(叶、枝、干、粗根、中根、细根)样品至少 50 g 用于测定全氮和全磷浓度。

4 月中旬,在各样地内随机布置 3 个 60 cm×60 cm 的尼龙网,每月下旬收集尼龙网中凋落物,烘干称重,用于计算全年的凋落物产量,并取部分样品测定全氮和全磷浓度。土壤与植物样品的全氮和全磷浓度,在混合催化剂(五水合硫酸铜与硫酸钾以 1∶10比例混合均匀)加浓硫酸消煮后,用 AutoAnalyzer Ⅲ型流动分析仪(Bran+Luebbe GmbH, Germany)测定。

1.4　叶凋落物分解实验

叶凋落物分解采用尼龙网袋法。在 2018 年 4 月中旬,将该月在地表收集的新鲜叶凋落物按样地混合后用于枯落物分解实验。将 5 g 烘干叶凋落物装入 10 cm×10 cm 大小的尼龙网袋中(0.1 mm 孔径)。每个样地中随机放置 6 个分解袋于地表,用铁丝和竹签固定,2018 年 10 月中旬取回称重,并测量全氮和全磷浓度。

1.5　数据计算与处理

将林木、地表枯落物和土壤 3 个部分设为 3 个养分分室,各分室的养分贮量、分室间的养分流通量与流通率计算如下。

1.5.1　贮量

(1)土壤贮量。土壤养分贮量 = $M_0 \times C_0$,其中 M_0为 0~60 cm 的土壤总质量(根据土壤容重计算),C_0为 4 月土壤样品的全氮或全磷(以下简称养分)浓度。

(2)枯落物层贮量。地表枯落物层养分贮量 = $M_1 \times C_1$,其中 M_1为 4 月份单位面积内的地表枯落物总质量,C_1为 4 月份枯落物层样品的养分浓度。

(3)林木贮量。林木养分贮量 = $\sum M_i \times C_i$,其中 M_i(i=1,2,3,4)为林木干、枝、叶、根各器官生物量(依据樟子松各器官生物量回归方程(焦树仁,1989),利用 4 月份树高与胸径计算),C_i为 4 月份林木各器官样品的养分浓度。

1.5.2　流通量

(1)归还量。归还量 = $M_2 \times C_2$,其中 M_2为生长季凋落物总产量(利用每月收集的凋落物重量计算),C_2为凋落物样品的养分浓度。

(2)分解释放量。分解释放量 = $M_3 \times C_3 - M_t \times C_t$,其中 M_3为以取样重量和样地面积估算出的枯落物层总质量,C_3为地表枯落物层的养分浓度,M_t为分解 180 天后的凋落物剩余总质量,C_t为凋落物分解 180 天后剩余样品的养分浓度。

(3)吸收量。吸收量 = 10 月份林木养分贮量 - 4 月份林木养分贮量+归还量

1.5.3　流通率:表示物质在单位时间内从一个分室向另一个分室转移的比率。

(1)吸收率 = 吸收量/土壤贮量

(2)归还率 = 归还量/林木贮量

(3)分解释放率 = 分解释放量/凋落物贮量

数据经 Excel 整理后,用 SPSS 22.0 软件进行数据正态分布检验和方差齐性检验,当满足方差分析条件后进行单因素方差分析(one-way ANOVA),检验各指标在不同处理中的差异性。由于样地处理的时间较短,处理的影响在数值上的体现可能并不悬殊,为减少出现忽略显著性差异的情况,将差异显著性水平设为 α=0.1。

2　结果与分析

2.1　降雨减少对土壤、林木和枯落物层氮磷贮量的影响

降雨减少 30%和 50%对于土壤和林木的氮贮量无显著影响(P = 0.452, P = 0.367; P = 0.15, P = 0.508),但显著降低了地表枯落物层氮贮量(P = 0.090, P = 0.019)。降雨减少对林木磷贮量无显著影响(P=0.877),但降雨减少 50%显著降低了土壤和枯落物层磷贮量(P=0.075, P=0.012),而降雨减少 30%的处理对二者均无显著影响(P=0.872, P=0.252)(图 1)。

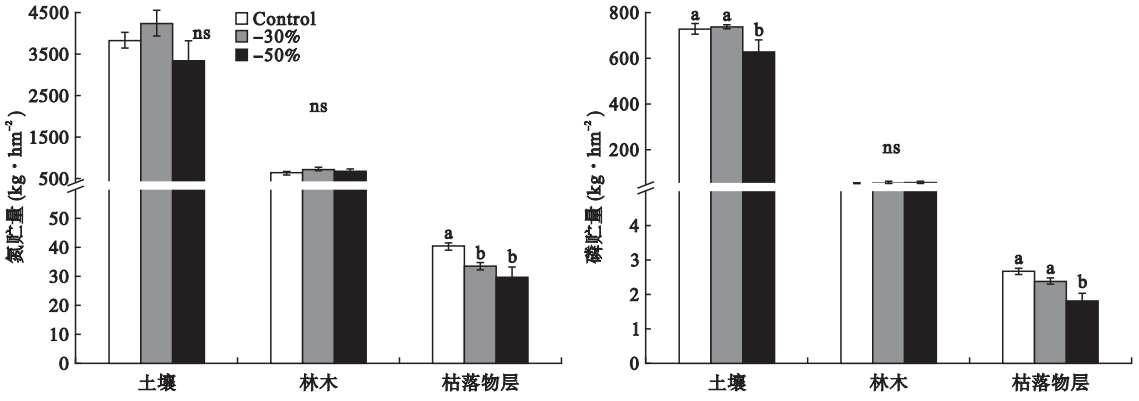


图 1 降雨减少对生长季初樟子松人工林中土壤、林木和枯落物层全氮和全磷贮量的影响

Fig.1 Effects of reduction in rainfall on total N and P storage in soil, tree and litter layer of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at the beginning of growing season

平均值±标准误。同一分室内不同字母表示处理间差异显著($P<0.1$);ns: $P>0.1$,下同。

2.2 降雨减少对氮磷养分在沙地樟子松固沙林生态系统中年吸收、归还、分解释放量的影响

降雨减少 30%对于林木的氮吸收量无显著影响($P=0.294$),而减少 50%显著降低了氮吸收量($P=0.099$),两个水平的处理均显著降低了氮归还量($P=0.053$, $P=0.019$),还使得氮分解释放量出现了下降趋势,其中降雨减少 50%对其影响显著($P=0.042$),而减少 30%则不显著($P=0.169$)。降雨减少对于磷吸收量无显著影响($P=0.52$, $P=0.451$),但使得磷归还量出现了下降趋势,其中降雨减少 50%对其影响显著($P=0.037$),而减少 30%则不显著($P=0.256$)(图 2)。磷分解释放量在降雨减少 30%的处理下出现了下降趋势,但不显著($P=0.724$),降雨减少 50%则使得枯落物层中的磷在生长季末的贮量较生长季初为高,说明此处理使枯落物层中的磷出现显著的富集现象($P=0.027$)。

2.3 降雨减少对樟子松固沙林中林木对氮磷的吸收、归还率和枯落物分解释放率的影响

降雨减少使得氮吸收率呈下降趋势,但并不显著($P=0.335$, $P=0.244$),两个水平的处理均显著降低了氮归还率($P=0.053$, $P=0.019$),降雨减少 50%显著降低 N 分解释放率($P=0.018$)。两个水平的降雨减少处理对于磷的吸收均未产生显著影响($P=0.563$, $P=0.786$),但降低了磷的归还和分解释放率,其中降雨减少 50%的影响显著($P=0.064$, $P=0.007$),而减少 30%则不显著($P=0.264$, $P=0.468$)降雨减少 50%使分解过程中磷产生了富集(图 3)。

2.4 降雨减少对樟子松树高、胸径以及各器官中氮磷年变化量的影响

该生长季初,各样地樟子松树高与胸径无显著差异($P>0.1$),生长季内对照组胸径平均增量为 0.63±0.06 cm,降雨减少30%组为0.92±0.16 cm,降

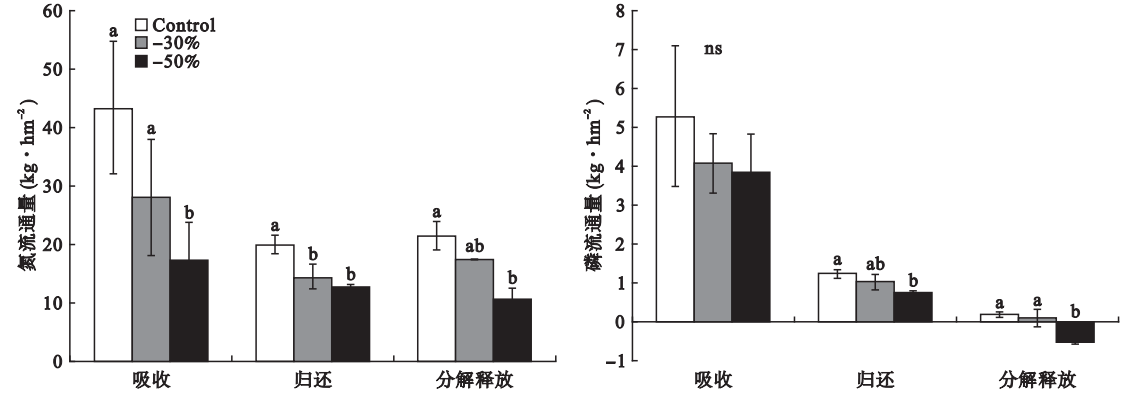


图 2 降雨减少对樟子松固沙林中氮磷的年吸收、归还与分解释放量的影响

Fig.2 Effects of reduction in rainfall on annual N and P absorption, return and decomposition of N and P in *Pinus sylvestis* var. *mongolica* plantation

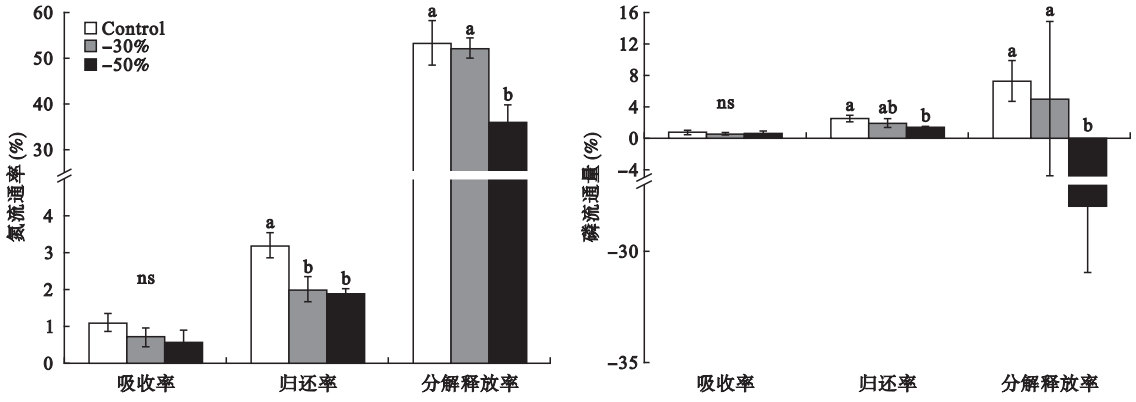


图 3　降雨减少对樟子松固沙林氮磷吸收、归还与分解释放率的影响

Fig.3　Effects reduction in rainfall on the rate of N and P absorption, return and decomposition in *Pinus sylvestis* var. *mongolica* plantation

表 1　降雨减少对樟子松胸径与树高增长的影响

Table 1　Effects of reduction in rainfall on the increase of diameter at breast height and height of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

处理	4 月		10 月		年增长量	
	胸径(cm)	树高(m)	胸径(cm)	树高(m)	胸径(cm)	树高(m)
Control	13.15±0.34	7.67±0.1	13.78±0.38	8±0.15	0.63±0.06	0.3±0.05
−30%	15.1±0.77	7.44±0.28	16.01±0.92	7.75±0.24	0.92±0.16	0.31±0.03
−50%	14.39±1.06	7.52±0.29	15.37±1.16	7.8±0.41	0.97±0.24	0.29±0.12

表 2　降雨减少对樟子松各器官中氮磷年变化量的影响(kg · hm^{-2} a^{-1})

Table 2　Effects of reduction in rainfall on the annual variation in N and P content in different organs of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

养分	处理	树干	树枝	叶	粗根	中根	细根
N	Control	−18.12±8.92a	1.58±0.24a	34.36±4.03a	14.46±3.84a	−14.84±7.67	6.98±4.83
	−30%	−56.06±17.93b	−4.06±1.61a	105.12±39.86b	−11.25±7.08b	−35.82±17.20	15.58±5.34
	−50%	−52.38±5.55b	−12.21±5.88b	100.46±11.18b	−16.18±8.16b	−22.54±6.24	8.54±1.04
P	Control	2.93±0.58	−0.24±0.07	3.70±1.52	−0.67±0.56	−1.36±1.29	−0.25±0.11
	−30%	2.79±0.25	−0.15±0.30	2.33±0.97	−1.22±1.06	−0.45±0.75	−0.25±0.34
	−50%	4.26±0.92	−0.08±0.07	3.96±0.80	−1.38±2.51	−3.08±0.72	−0.59±0.37

雨减少 50% 组为 0.97±0.24 cm(P = 0.281, P = 0.205);对照组树高平均增量为 0.30±0.05 m,降雨减少 30% 组为 0.31±0.03 m,降雨减少 50% 组为 0.29±0.12 m(P=0.927,P=0.935),两个水平的降雨减少处理均未对其造成显著影响(表 1)。

树干、树枝、粗根和中根中的氮含量的年变化量在一些处理中为负值,表明经过一个生长季的生长,其氮含量下降。叶片和细根中的氮含量在各处理中均为正值,表明经过一个生长季的生长,其氮含量逐渐增加。两个水平的降雨减少处理均显著降低了树干(P=0.067,P=0.090)、粗根(P=0.033,P=0.017)中的 N 含量的年变化量,显著升高了叶中的氮含量的年变化量(P=0.082,P=0.100),降雨减少 50%处理还显著降低了树枝中的氮含量的年变化量(P=0.033),对其余器官氮含量的年变化量影响则不显著(P>0.1)。两个水平的降雨减少处理均未对樟子松各器官磷含量的年变化量造成显著影响(P>0.1)(表 2)。

3　讨　论

氮元素主要以铵盐(NH_4^+)和硝酸盐(NO_3^-)的形式被植物吸收,二者溶解到水中后被植物根系吸收并转移到地上部分,因此植物水分状况往往会限制氮素的吸收和同化(王喜庆等,1997)。当植物受到土壤水分的胁迫时,对氮素的吸收和运输能力降低(Kaiser,1987;赵全志等,2006);同时作为微生物参与的生物化学过程,土壤氮素矿化也会受到土壤水分条件的影响,土壤含水量下降会导致土壤氮矿

化强度下降,降低氮的可利用性(巨晓棠等,1998)。研究中降雨减少 50%显著降低了樟子松对氮元素的吸收量,即显示了降雨减少限制氮素吸收的结论,而降雨减少 30%处理则未对氮吸收形成显著影响,可能是该处理未达到足够的胁迫水平。同时,降雨减少处理对樟子松对磷吸收量影响不显著,可能是因为磷并非樟子松生长的主要限制因子,由于磷元素相对并不匮乏,所以并未对吸收总量造成显著影响。

有研究发现,减水处理会导致针叶全氮含量显著降低(褚建民等,2011);但也有研究发现,轻度干旱并不会降低植物的叶氮水平,甚至有促进作用,因为轻度干旱可以限制叶片早衰,促进光合性能,导致叶氮含量上升,而中度和严重干旱才会显著降低叶氮水平(许振柱等,2004)。由表 2 可见,两个水平的降雨减少处理均显著提高了叶氮含量,故可初步认为,这两个降雨减少水平对樟子松均造成了轻度水分胁迫。同时在本研究中,树干、树枝和粗根中的氮含量随降雨减少显著降低(表 2),体现出氮由以上 3 个器官向叶转移的趋势。已有的研究表明,在面对轻度干旱胁迫时,林木将养分由根、茎等养分贮藏器官向养分需求大的器官转移(任艳林等,2012;雷虹等,2017)。本实验中的转移趋势,可能反映了樟子松在轻度水分胁迫下限制叶片早衰、促进光合性能的应对策略(刘洋等,2006)。而两个水平的降雨减少处理均未对磷在植物体内的再分配产生显著影响(表 2),说明在轻度水分胁迫以及磷并非主要限制因子的背景下,植物对磷的再分配并无必要。

水分对森林生态系统的影响广泛而复杂。在干旱与半干旱地区降水与凋落物产量的方面,降水量与凋落量呈正相关关系(Liu *et al.*, 2004)和无显著关系(凌华等,2009)的研究结果皆有报道,干旱化对凋落物产量的影响目前尚没有得出明确的结论。本研究中,减雨处理对樟子松人工林的年凋落量并未造成显著影响($P=0.280$,$P=0.282$),这或许反映了非干旱区与干旱区林木抗旱机制的不同。在非干旱区,林木会通过大量落叶以减少蒸腾作用(杨玉盛等,2004),而干旱区抗旱性较强的林木,则有着更强的生理调节能力以应对干旱胁迫(朱教君等,2007),毋需大量落叶。相比之下,减雨 30%使得凋落物氮浓度显著下降了 12.9%($P=0.003$),磷浓度下降了 6.0%,但不显著($P=0.271$);减雨 50%使得凋落物氮浓度显著下降了 22.6%($P=0.032$),磷浓度显著下降了 27.9%($P=0.001$),使得氮磷归还量与归还率下降。与此同时,尽管降雨减少造成了氮吸收量的下降,但归还量的同时降低使得氮净增量无显著变化($P=0.382$,$P=0.138$),体现了林木面对干旱化的抗逆性。氮和磷是植物体内极易转移被再利用的元素,它们在落叶前往往转移到植物体的其他部分(田大伦等,1989),而水分胁迫可以加剧这一趋势(Kaiser,1987)。在以上影响之下,降雨减少使得氮磷归还量与归还率下降,并导致枯落物层氮磷养分贮量随之下降。

另一方面,降雨减少还会影响凋落物的理化性质,从而影响其分解速度。Erhagen 等(2013)的研究表明,植物会通过增加木质素含量来保护叶片不受干旱胁迫,从而导致凋落物木质素含量升高(杨予静等,2018)。木质素是是凋落物中最难分解的组分,使凋落物的易分解程度下降(Osono,2007)。有研究还指出凋落物较低的初始氮浓度会抑制凋落物的分解(Berg,2000),可能是因为氮会对起降解作用的真菌的群落活性及组成产生影响(Aerts,1997)。在一些温带生态系统中,高降雨量的嫌气条件会使微生物对凋落物的分解减慢,而降雨减少对其影响相对较小(Vitousek *et al.*,1994),以上研究表明半干旱区降雨减少会抑制凋落物的分解。本研究中,降雨减少 30%未对氮磷养分分解释放量造成显著影响,而降雨减少 50%使氮的分解释放量出现了显著下降(图 2),一定程度上反映了这一趋势。而由于枯落物层的氮贮量与分解释放量同时出现下降趋势,使得枯落物层氮的分解释放率未发生显著变化(图 3),另一方面,降雨减少 50%使得地表枯落物层中的磷出现了显著的富集,可能与凋落物养分释放速率小于干质量损失率有关,也可能是降雨减少减弱了磷酸盐的淋溶,并影响微生物活动导致固持所致(刘祥等,2006)。这与先前研究得出的大多数凋落叶在分解初期磷发生积累,然后释放的结论一致(李志安等,2004;王希华等,2004)。这也说明了降雨减少 50%显著推迟了磷的释放(图 3)。

在氮磷的吸收、分解和归还三个流通率中,降雨减少对归还与分解释放率均造成了显著的下降影响,而对吸收率的影响并不显著(图 3),这种流通率变化不同步的状况可能会造成生态系统养分循环的失衡。但是,以上讨论是建立在本生长季内观测数据之上,而降雨减少对森林生态系统的影响具有时滞性(Liu *et al.*,2004),需要进一步的研究观测。

4　结　论

减少降雨显著降低了沙地樟子松固沙林中林木对氮的吸收量、归还与分解释放量以及氮的归还和分解释放率,在50%减雨处理下尤为显著,而对氮吸收率影响并不显著。降雨减少50%显著降低了磷的归还与分解释放量以及归还和分解释放率,同样在50%减雨处理下尤为显著,而对磷的吸收量和吸收率影响不显著。减少降雨对樟子松生物量无显著影响,但使得植株内氮元素出现了显著的由树干、枝、粗根向叶转运的趋势,而对植株内磷分布无显著影响。水分作为干旱半干旱地区植被生长发育最主要的限制因子,对于植物对氮磷养分的吸收、分配与归还、凋落物分解都具有广泛而复杂的影响。在当前气候变化趋势之下,降水的减少有可能对固沙林的生长造成较严重的负面影响,营林时应注意对造林密度和林分结构进行更合理的规划与控制,并加强林区的集水整地以应对未来的气候变化。

致　谢　野外工作中得到刘丽、郑琳琳和张晶玲的大力支持,室内测试分析得到了艾桂艳和李晶石的帮助,深表谢意。

参考文献

褚建民, 邓东周, 王　琼, 等. 2011. 降雨量变化对樟子松生理生态特性的影响. 生态学杂志, **30**(12): 2672-2678.

郭忠升. 2010. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度. 应用生态学报, **21**(12): 3029-3035.

焦树仁. 1989. 章古台固沙林生态系统的结构与功能. 沈阳: 辽宁科技出版社.

焦树仁. 2001. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施. 林业科学, **37**(2): 131-138.

巨晓棠, 李生秀. 1998. 土壤氮素矿化的温度水分效应. 植物营养与肥料学报, **4**(1): 37-42.

雷　虹, 王　凯, 田　浩, 等. 2017. 小叶锦鸡儿幼苗非结构性碳水化合物积累及分配对干旱胁迫的响应. 生态学杂志, **36**(11): 3168-3175.

李雪峰, 韩士杰, 张　岩. 2007. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响. 应用生态学报, **18**(2): 261-266.

李志安, 邹　碧, 丁永祯, 等. 2004. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, **23**(6): 77-83.

林年丰, 汤　洁. 2001. 中国干旱半干旱区的环境演变与荒漠化的成因. 地理科学, **21**(1): 24-29.

凌　华, 陈光水, 陈志勤. 2009. 中国森林凋落量的影响因素. 亚热带资源与环境学报, **4**(4): 66-71.

刘　祥, 侯兰英, 王宏伟. 2002. 科尔沁沙地环境退化与可持续性发展. 内蒙古农业大学学报: 社会科学版, **4**(1): 34-36.

刘　洋, 张　健, 冯茂松. 2006. 巨桉人工林凋落物数量, 养分归还量及分解动态. 林业科学, **46**(7): 1-10.

刘新平, 何玉惠, 赵学勇, 等. 2011. 科尔沁沙地奈曼地区降水变化特征分析. 水土保持研究, **18**(2): 155-158.

龙　健, 李　娟, 江新荣, 等. 2004. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. 土壤学报, **41**(4): 597-602.

任艳林. 2012. 降水变化对樟子松人工林土壤无机氮和净氮矿化速率的影响. 北京大学学报: 自然科学版, **48**(6): 925-932.

田大伦, 朱小年, 蔡宝玉, 等. 1989. 杉木人工林生态系统凋落物的研究: Ⅱ. 凋落物的养分偏量及分解速度. 中南林学院学报, (A9): 45-55.

王　凯, 沈　潮, 曹　鹏, 等. 2018. 沙地樟子松幼苗干旱致死过程中非结构性碳水化合物的变化. 应用生态学报, **29**(11): 3513-3520.

王希华, 黄建军, 闫恩荣. 2004. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. 植物生态学报, **28**(4): 457-467.

王喜庆, 李生秀, 高亚军. 1997. 土壤水分在提高氮肥肥效中作用机制. 西北农业大学学报, **25**(1): 16-19.

许振柱, 王崇爱, 李　晖. 2004. 土壤干旱对小麦叶片光合和氮素水平及其转运效率的影响. 干旱地区农业研究, **22**(4): 75-79.

阎秀峰, 李　晶, 祖元刚. 1999. 干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响. 生态学报, **19**(6): 850-854.

杨予静, 刘世荣, 陈　琳, 等. 2018. 模拟降雨减少对马尾松人工林凋落物量及其化学性质的短期影响. 生态学报, **38**(13): 4770-4778.

杨玉盛, 陈银秀, 何宗明, 等. 2004. 福建柏和杉木人工林凋落物性质的比较. 林业科学, **40**(1): 2-10.

姚剑飞, 吴　俊, 叶要清, 等. 2013. 影响黄山古树名木生长的因素及对策. 安徽农学通报, **19**(9): 114-115.

曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 等. 2005. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率. 林业科学, **41**(5): 21-27.

张永民, 王云霞, 席桂萍. 2006. 科尔沁沙地及其周围地区降水与气温变化的多时间尺度分析. 内蒙古农业大学学报, **27**(2): 30-33.

赵全志, 高桐梅, 宁慧峰, 等. 2006. 旱稻叶片含氮量与水分含量的定量关系. 水土保持学报, **20**(4): 183-185.

周双喜, 吴冬秀, 张　琳, 等. 2010. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响. 植物生态学报, **34**(10): 1155-1164.

朱教君, 康宏樟, 许美玲, 等. 2007. 外生菌根真菌对科尔沁沙地樟子松人工林衰退的影响. 应用生态学报, **18**(12): 2693-2698.

Aerts R. 1997. Climate, leaf chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship. *Oikos*, **79**: 439-449.

Ain-Lhout F, Zunzunegui M, Diaz Barradas MC, *et al*. 2001. Comparison of proline accumulation in two Mediterranean shrubs subjected to natural and experimental water deficit. *Plant and Soil*, **230**: 175-183.

Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*,

133: 13-22.

Bray JR, Gorham E. 1964. Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research*, **2**: 101-157.

Choat B, Brodribb TJ, Brodersen CR, *et al*. 2018. Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, **558**: 531-539.

Clark DA, Brown S, Kichlighter WK, *et al*. 2001. Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, **11**: 371-384.

Erhagen B, Öquist M, Sparrman T, *et al*. 2013. Temperature response of litter and soil organic matter decomposition is determined by chemical composition of organic material. *Global Change Biology*, **19**: 3858-3871.

Fay PA, Carlisle JD, Knapp AK, *et al*. 2000. Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: Design and performance of rainfall manipulation shelters. *Ecosystems*, **3**: 308-319.

Fay PA, Kaufman DM, Nippert JB, *et al*. 2008. Changes in grassland ecosystem function due to extreme rainfall events, implications for responses to climate change. *Global Change Biology*, **14**: 1600-1608.

He M, Dijkstra FA. 2014. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: A meta-analysis. *New Phytologist*, **204**: 924-931

Huang J, Zhang JC, Zhang ZX, *et al*. 2011. Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **25**: 781-792.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I. Cambridge: Cambridge University Press.

Kaiser WM. 1987. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. *Physiologia Plantarum*, **71**: 142-149.

Liu CJ, Carl JW, Björn B, *et al*. 2004. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Global Ecology and Biogeography*, **13**: 105-114.

Osono T. 2007. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research*, **22**: 955-974.

Schlesinger WH, Dietze MC, Jackson RB, *et al*. 2016. Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology*, **22**: 2318-2328.

Stanford G, Epstein E. 1974. Nitrogen mineralization-water relations in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, **38**: 103-107.

Vitousek PM, Turner DR, Parton WJ, *et al*. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, **75**: 418-429.

Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, *et al*. 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, **53**: 941-952.

Zhao Q, Zeng DH, Fan ZP, *et al*. 2008. Effect of land cover change on soil phosphorus fractions in southeastern Horqin sandy land, northern China. *Pedosphere*, **18**: 741-748.

Zhu JJ, Kang HZ, Gonda Y. 2007. Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. *Pedosphere*, **17**: 801-812.

作者简介 谢 尧,男,1992 年生,硕士研究生,主要从事森林生态学研究。E-mail: ww6333@126.com

责任编辑 魏中青