

降水改变对樟子松人工林土壤微生物量碳及微生物商动态变化的影响

魏天凤¹ 任艳林² 曾辉¹ 贺金生^{2,*}

11 北京大学深圳研究生院环境与城市学院, 深圳 518055; 21 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871;
- 通讯作者, E-mail: jshe@pku.edu.cn

摘要 在北京大学地球环境与生态系统塞罕坝实验站樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林内设置降水控制实验, 研究地下生态系统过程的两个重要指标土壤微生物量碳和微生物商对穿透雨增加或减少 30% 的响应。在 2007 年 5 月到 9 月的生长季, 土壤微生物量碳和微生物商平均值分别为 2601.7 mgPkg 和 11.84%, 二者随土壤深度增加呈下降趋势。总体上, 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳和微生物商的生长季内平均值影响不显著, 但穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳及微生物商的变幅较大, 变化范围分别为 2431.1 ~ 3541.3 mgPkg 和 11.43% ~ 21.16%, 5 月最高, 7 月最低, 表明生长季内穿透雨减少将导致土壤微生物活动的较大波动, 从而可能改变地下碳过程的季节变化规律。

关键词 碳循环; 生态系统地下过程; 穿透雨; 塞罕坝; 樟子松人工林
中图分类号 S718

Effects of Throughfall Manipulation on the Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Microbial Quotient in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation

WEI Tianfeng¹, REN Yanlin², ZENG Hui¹, HE Jinsheng^{2,*}

11 School of Environment and Urban Studies, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055;
21 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;
- Corresponding Author, E-mail: jshe@pku.edu.cn

Abstract A field experiment manipulating throughfall was constructed in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at PKU-SOGES. This study investigated the response of two indicators of belowground ecosystem processes, soil microbial biomass carbon and microbial quotient, to ? 30% throughfall amount. During the growing season from May to September, 2007, soil microbial biomass carbon (2601.7 mgPkg) and microbial quotient (11.84 %) decreased with soil depth. Generally, the effects of ? 30% throughfall amount on the means of soil microbial biomass carbon and soil microbial quotient in the growing season were not significant. Interestingly, the dynamics were much clear for the - 30% throughfall treatment, with soil microbial biomass ranged from 2431.1 mgPkg to 3541.3 mgPkg and microbial quotient from 11.43% to 21.16%, and the highest value was in May and the lowest was in July. This indicates that the decrease of precipitation in a growing season may lead to a stronger fluctuation in soil microbial activity, thus alter the dynamics of belowground carbon cycle processes.

Key words carbon cycles; ecosystem belowground process; throughfall; Saihanba; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

未来全球气候变化情景下,全球或局部地区的降水格局(降水量、降水强度及降水的季节分配)将发生改变^[1]。例如,1900) 2005 年,北半球中高纬度(30) 85bN) 降水量增加了 6%~ 8%^[1]。从我国来看,1960) 2000 年,虽然总的降水量只增加了 2%,但降水频率减少了 10%,降水强度明显增加^[2]。降水格局改变引起的土壤水分变化将直接影响植物和土壤微生物对水分的利用,并间接影响到陆地生态系统功能与过程^[3],这已成为全球变化研究的重要内容之一。

自 20 世纪 90 年代以来,一些研究机构开始进行大型野外降水控制实验来评估降水格局改变对生态系统的影响过程。这些研究包括草原和森林生态系统的物种组成、植被生产力以及土壤呼吸等对降水格局改变的响应^[4-7]。但最近很多研究都强调土壤微生物在降水改变条件下,通过影响土壤养分的矿化作用,从而影响生态系统的功能^[8]。随着我国全国范围的植树造林活动的开展,未来人工林生态系统将在全国森林中占有较大比重。这些人工林生态系统对未来的气候变化如何响应,将关系到人工林的生态系统服务功能,特别是碳汇功能。

土壤微生物是生态系统分解者亚系统中的主要组成部分,可以调控养分循环、能量流动,并最终影响植被与生态系统生产力^[9]。土壤微生物量碳作为土壤活性有机碳的一部分,只占土壤总有机碳的 1%~ 3%,但其周转时间较快,对外界环境变化较敏感,因此可以作为土壤总有机质变化的早期预测指标^[10]。土壤微生物量碳和微生物商作为生态系统地下过程的两个重要指标,在研究生态系统对降水响应过程中,具有重要作用。

樟子松是一种耐干旱、耐寒冷、耐瘠薄的树种,在我国遏制土壤荒漠化进程中起到重要作用,也是河北省塞罕坝机械林场的主要造林树种之一。过去对樟子松人工林的研究大多关注植被生产力、土壤肥力和固沙能力等,而对这种营养匮乏的生态系统与气候变化之间的关系则鲜有研究。河北坝上樟子松人工林分布在对气候变化敏感的森林草原交错区,降水改变引起的土壤水分变化可能对樟子松人工林生态系统有重要影响。因此,本研究的具体目的为: 1) 揭示樟子松人工林土壤微生物量碳与微生物商随土壤剖面的垂直变化特征; 2) 分析土壤微生物量碳与微生物商在生长季内的动态变化; 3) 比较穿透雨增加和减少 30% 对人工林土壤微生物

量碳与微生物商的影响。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究在北京大学地球环境与生态系统实验站西侧的樟子松人工林降水控制实验样地内进行(图 1)。该样地位于河北省围场县塞罕坝机械林场境内,海拔约 1531 m,地理坐标为 42b25cN, 117b15cE。塞罕坝地区位于内蒙古高原东南缘,地处森林草原交错带,属于半干旱半湿润气候区。冬季漫长而寒冷,春季较短,夏季不明显;年平均气温 - 11.2 e, 1 月平均气温 - 21.18 e, 7 月平均气温 16.12 e, 年平均降雨量 437.18 mm。样地土壤类型为风沙土,主要植被类型为 24 年生樟子松林,乔木胸径平均为 12 cm,树高平均为 9 m。林下灌木稀少,草本层以披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、腺毛委陵菜(*Potentilla longifolia*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、瓣蕊唐草(*Thalictrum petaloidum*) 为主。

1.2 实验设计及降水控制效果

实验样地占地 1 hm², 设置了 9 个 20 m @ 20 m 的样方, 包括以下 3 种处理方式。

- 1) 对照: 保持自然穿透雨量。
- 2) 穿透雨减少 30%: 用覆盖地表面积 30% 的薄膜水槽转移走该样地 30% 的穿透雨量。
- 3) 穿透雨增加 30%: 把相应穿透雨减少样地转移来的 30% 穿透雨量用固定在地表的自动喷灌系统增加到该样地。

每种处理包括 3 个重复样方, 各样方间距 10 m 作为缓冲带。在每个穿透雨减少样方中, 12 条离地 115 m, 用镀锌管支撑呈一定倾斜角度的 0.15 m @ 20 m(覆盖地表 30%) 无色透明塑料薄膜水槽将穿



图 1 降水控制实验设施

Fig 1 Throughfall manipulation system

透雨汇集到 2000 L 的黑色树脂水罐中, 在雨水到达水罐中预先设置的水位后自动控制系统启动, 将雨水喷灌到相应的穿透雨增加样地中, 实现穿透雨的有效截流与转移。在对照、穿透雨增加的样方中, 覆盖地表 30% 的无色透明塑料薄膜水槽均匀打孔, 让降水自然穿透薄膜, 使林下光照和穿透雨减少样方保持一致。根据坝上地区的气候特点, 降水控制实验主要对生长季的穿透雨进行转移与再分配。冬季撤掉降雨设施是国际惯例, 目的是不改变冬季积雪对土壤的保温作用。本实验设施于 2006 年 6 月建成并开始运转, 同年 10 月将塑料薄膜撤掉, 并于 2007 年 5 月初重新安装, 继续观测至 2007 年 10 月。本研究自 2007 年 5 月生长季开始一直持续观测到 2007 年晚秋 9 月。

降水控制实验对土壤含水量的处理效果明显(表 1, 图 2(a)), 除 2007 年 5 月外, 穿透雨增加 30%, 土壤含水量的平均值最高; 穿透雨减少 30%, 土壤含水量的平均值最低。处理间的显著差异主要体现在 7, 8, 9 月。3 种穿透雨处理样地地下 10 cm 处的土壤日均温在生长季内有显著差异($P = 0.033$)(表 1), 穿透雨减少 30% 的土壤温度略高($P = 0.1009$)(表 1, 图 2(b))。这种情况也同样出现在其他

降水控制实验研究中^[45]。从土壤特性和群落特征来看, 土壤容重、土壤总有机碳、林分密度以及林下草本植物群落地上生物量的处理间差异总体上都不显著($P > 0.05$)。但多重比较结果表明(表 1), 穿透雨减少 30% 的土壤总有机碳高于对照处理($P = 0.040$), 这主要是由土壤背景值异质性引起的。

1.3 采样与分析

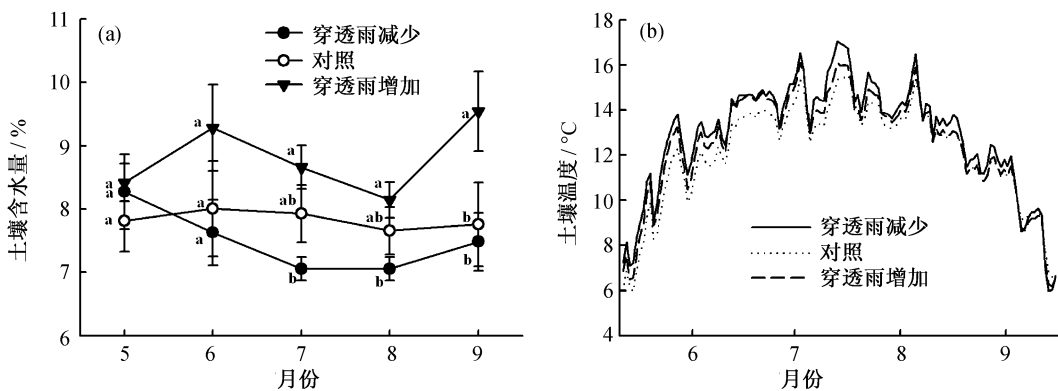
土壤样品分 5 次于 2007 年 5 月 26 日、6 月 26 日、7 月 24 日、8 月 22 日和 9 月 20 日采集。首次采样时在每个样地内随机选取 5 个 1 m @ 1 m 的小样方, 去除采样点地表枯落物后, 用内径 5 cm 的土钻分 4 层(0~ 5, 5~ 10, 10~ 20 和 20~ 30 cm) 钻取土芯样品, 将 5 个小样方中的样品同层混匀后作为该样地的样品。随后的 4 次采样都在首次采样划定的小样方内。采回的土样立即通过 2 mm 筛, 一部分在冰箱中 4 e 保存以分析土壤微生物量碳, 另一部分在室温下风干, 过 1 mm 和 0.25 mm 筛, 供土壤总有机碳分析使用。

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸 - K_2SO_4 浸提法测量^[11-12]。浸提液中的有机碳采用总有机碳分析仪(Multi NPC 3100, Analytik jena AG, Germany)测定。以熏蒸土样与未熏蒸土样提取的有机碳差值除以浸

表 1 3 种处理样地基本情况的比较
Table 1 Comparisons of different throughfall treatments

处理	土壤含水量P%	土壤温度P _e	土壤容重 P($g\#cm^{-3}$)	土壤总有机碳 P($g\#kg^{-1}$)	林分密度 P(株 $\#hm^{-2}$)	地上生物量 P($g\#m^{-2}$)
穿透雨减少 30%	7.50 ^a	12.88 ^a	1.32 ^a	17.06 ^a	3300 ^a	17.77 ^a
对照	7.83 ^b	12.09 ^b	1.36 ^a	12.59 ^b	4100 ^a	18.26 ^a
穿透雨增加 30%	8.81 ^c	12.49 ^{ab}	1.35 ^a	13.32 ^{ab}	3400 ^a	23.28 ^a

说明: 土壤含水量为采样期的平均值, 土壤温度为 2007 年 5 月 26 日) 9 月 30 日的日均温平均值, 地上生物量为林下草本植物群落的地上生物量。列中不同小写字母上角标表示处理间平均值差异显著($P < 0.05$)。



图中数据点为平均值 ± 标准误差, 不同小写字母表示同一月份内不同处理的平均值差异显著($P < 0.05$)。土壤含水量为每次采样时测定的土壤质量含水量, 土壤温度为地下 10 cm 土壤日均温

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 2 降水控制实验对土壤含水量(a)和地下 10 cm 土壤温度(b)的效应

Fig 2 The effects of throughfall manipulation on soil water content (a) and - 10 cm soil temperature (b)

提有效转换系数 k_{ec} , k_{ec} 取值 $0.137^{[12-13]}$, 计算土壤微生物量碳。土壤总有机碳采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法, 土壤质量含水量采用差量法测量, 土壤容重用环刀法测定, 每小时的土壤温度用埋在地下 10 cm 处 StowAway TidBit 袖珍温度记录仪 (Onset Computer Corporation, Pocasset, USA) 自动监测。

1.1.4 数据处理

数据经 Microsoft Excel 整理后, 主要采用 SPSS 13.10 进行统计分析。采用重复测定方差法 (repeated measures of ANOVA) 比较多种因素如穿透雨增加和减少 30% 的处理、月份、土壤深度及其交互作用对土壤微生物量碳和微生物商的影响; 对不同处理、月份、土壤深度的土壤微生物量碳和微生物商进行多重比较时采用 Fisher's LSD 法 (Fisher's least significant difference) 进行检验。在所有分析中, 如果 $P < 0.05$ 则认为结果显著。绘图软件采用 SigmaPlot 10.10。

2 结果与讨论

2.1 土壤微生物量碳、微生物商及其垂直分布

樟子松人工林地下 0~30 cm 的土壤微生物量碳的平均值为 2601.7 mg/kg (表 2)。与 Zhang 等^[14] 在半干旱地区栎树林对土壤微生物量碳的研究 ($100\sim 300 \text{ mg/kg}$) 接近。土壤微生物量碳变幅为 $5110\sim 6461.0 \text{ mg/kg}$, 与半干旱地区针叶林土壤微生物量碳的变幅 ($1421.4\sim 7291.5 \text{ mg/kg}$)^[15] 以及中亚热带地区不同林地 0~30 cm 土壤微生物量碳的变幅 ($9516\sim 6801.2 \text{ mg/kg}$)^[16] 接近。

微生物商是土壤微生物量碳与土壤总有机碳的比值, 可以解释为底物碳的可利用度或被微生物固

定的总有机碳的比例^[17]。樟子松人工林地下 0~30 cm 土壤微生物商变幅为 $0.178\%\sim 4.12\%$, 平均值为 1.184% 。Bauhus 等^[18] 报道不同林地的土壤微生物商变幅为 $0.153\%\sim 2.141\%$, 姜培坤^[16] 所研究的林地 0~30 cm 土壤微生物商的变幅为 $0.190\%\sim 2.151\%$ 。土壤异质性和穿透雨改变处理可能是导致本研究与上述研究相比微生物商变幅较大的原因。

土壤微生物量碳随土壤深度的增加有下降的趋势 (表 2), 这与以前的研究^[16, 19] 一致, 这种递减现象可能与土壤容重密切相关 (图 3(a))。样地土壤中的有机质主要集中在表层, 底层土壤容重较大, 导致土壤微生物量碳较低。同样, 微生物商随土壤深度增加而下降的趋势与姜培坤^[16]、Castellazzi 等^[20] 的研究一致, 也说明土壤表层积累的土壤微生物量碳较多。

2.2 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳及微生物商的影响

由于和土壤深度相关的交互作用对土壤微生物量碳及微生物商的影响都不显著 (表 3), 以下综合所有土壤层次的数据进行分析。重复测定方差分析结果表明, 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳的影响不显著 ($P = 0.1067$) (表 3); 而多重比较结果则显示, 穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳高于对照 ($P = 0.1029$) (图 4(a))。同样, 穿透雨增加或减少 30% 对微生物商的影响也不显著 ($P = 0.1193$) (表 3, 图 4(b))。穿透雨增加或减少 30% 和月份两种因素的交互作用对土壤微生物量碳及微生物商的影响显著 ($P = 0.001$, $P = 0.002$) (表 3)。5 月穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳较高, 9 月穿透雨减少 30% 的微生物商较低 (图 5)。

表 2 土壤微生物量碳及微生物商的垂直分布
Table 2 Vertical distribution of soil microbial biomass carbon and microbial quotient

变量	土壤深度/cm	穿透雨处理		
		穿透雨减少 30%	对照	穿透雨增加 30%
土壤微生物量碳 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0~5	424.1(37.1) ^a	353.6(25.0) ^a	371.3(20.4) ^a
	5~10	289.6(24.9) ^b	228.2(17.5) ^b	276.8(13.4) ^b
	10~20	238.6(16.6) ^c	186.2(13.3) ^c	218.7(12.1) ^{bc}
	20~30	198.4(14.3) ^d	145.9(11.6) ^d	196.9(12.2) ^c
微生物商/%	0~5	2.38(0.21) ^a	2.52(0.13) ^a	2.35(0.16) ^a
	5~10	1.62(0.10) ^b	1.75(0.09) ^b	2.18(0.10) ^a
	10~20	1.51(0.10) ^b	1.70(0.10) ^{bc}	1.67(0.09) ^b
	20~30	1.33(0.09) ^c	1.41(0.11) ^c	1.64(0.08) ^b

说明: 表中数据为 2007 年 5 月到 9 月的平均值 (标准误差)。微生物商为土壤微生物量碳与土壤总有机碳的比值。列中不同小写字母上角标说明同 (不同) 处理不同土壤深度的平均值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

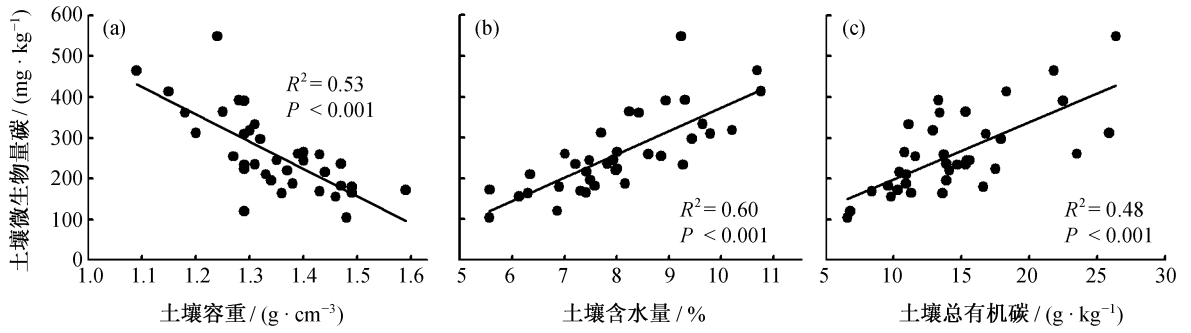


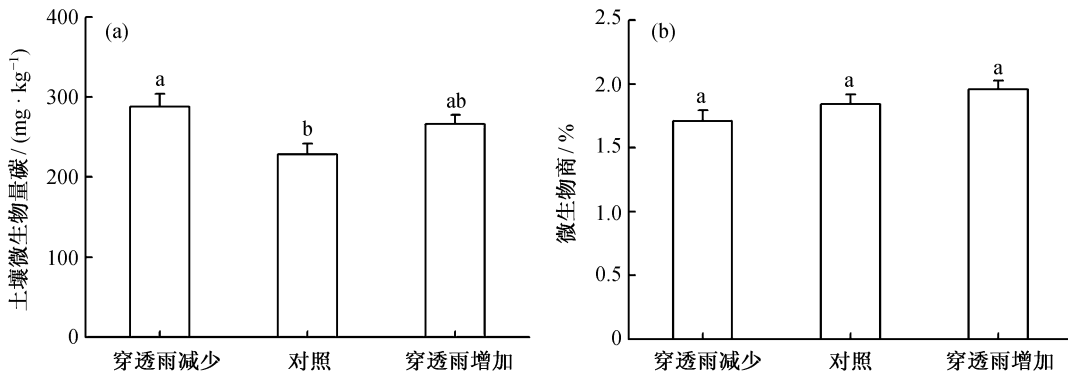
图 3 土壤微生物量碳与土壤容重(a)、土壤含水量(b)、土壤总有机碳(c)的关系

Fig 3 Relationships of soil microbial biomass carbon with soil bulk density (a), soil water content (b), and soil total organic carbon (c)

表 3 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳和微生物商影响效应的重复测定方差分析

Table 3 Repeated measures of ANOVA for the effects of ± 30% throughfall on soil microbial biomass carbon and microbial quotient

差异来源	土壤微生物量碳			微生物商		
	自由度	F 值	P 值	自由度	F 值	P 值
组内效应						
月份	4	3.269	0.015	4	2.762	0.032
月份@处理	8	3.567	0.001	8	3.356	0.002
月份@深度	12	1.375	0.191	12	1.431	0.165
月份@处理@深度	24	0.960	0.524	24	1.100	0.359
组间效应						
处理	2	3.032	0.067	2	1.763	0.193
深度	3	14.594	0.000	3	15.003	0.000
处理@深度	6	0.153	0.987	6	0.067	0.675



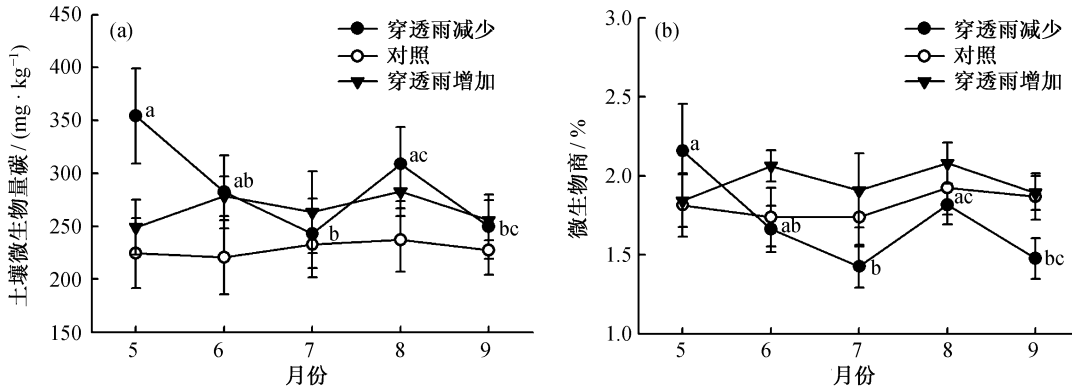
图中数据为平均值+ 标准误差。不同的小写字母表示多重比较中不同穿透雨处理的平均值差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳 (a) 及微生物商 (b) 的影响

Fig 4 Effects of ± 30% throughfall on soil microbial biomass carbon (a) and microbial quotient (b)

总体来说, 增加和减少 30% 穿透雨量的处理对坝上樟子松人工林 2007 年生长季内的土壤微生物量碳的平均值影响不显著。增加 30% 的穿透雨量没有导致土壤微生物量碳的显著变化, 这与半干旱地区栎树林生态系统中的研究结果相似^[14]。在该研究中, 添加水分后的几小时到几天内, 土壤微生物量碳显著下降, 但随后几个月内添加水分与对照之间并没有显著差别。Illeris 等^[21] 则发现生长季内增加一倍降水会导致极地半干旱荒漠生态系统土壤

微生物量碳增加。本研究结果可能主要是以下原因引起的。第一, 与其他研究相比, 本研究在未改变降水频率的情况下将穿透雨增加和减少 30% 的处理强度较低。虽然土壤微生物量碳与土壤含水量之间具有显著的正相关关系(图 3(b)), 但所测定的土壤含水量为每次采样时的瞬时值, 而土壤微生物量碳对穿透雨改变处理的响应可能还受到季节性温度、养分动态的干扰。第二, 由于所测定的土壤微生物量是微生物细胞质中的含量, 反映的是整体微生物



图中数据为平均值 ± 标准误差。不同小写字母表示穿透雨减少 30% 处理不同月份间的平均值差异显著 (P < 0.05)

图 5 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳(a)及微生物商(b)动态变化的影响

Fig 5 Effects of 30% throughfall on dynamics of soil microbial biomass carbon (a) and microbial quotient (b)

量,并没有将休眠的以及非活跃态的同活跃态的微生物量区分开^[22-23],很可能只是土壤中处于活跃态的土壤微生物发生了变化,但这部分变化不足以引起穿透雨增加 30% 与对照处理间的差异。第三,植物通过根系输送到土壤中的碳是限制土壤中微生物量碳含量的重要因素之一^[24-25]。在降水增加减少 33% 的长期控制实验中(5 年),水分改变并没有对落叶松林的细根生产力产生显著影响^[26],因此降水改变对土壤环境的影响较为复杂,较小幅度的改变并不能直接影响到土壤微生物的活动,土壤中养分的浓度、碳周转速率等因素对土壤微生物的影响可能更重要。第四,土壤微生物量碳对水分改变的响应存在滞后效应,但本研究观察时间较短。穿透雨增加 30% 的土壤微生物量碳平均值比对照处理的平均值高 161%,说明穿透雨增加对土壤微生物量碳具有潜在影响,但穿透雨量改变的程度以及观察时间的长短可能是决定这种影响是否显著的重要因素之一。

虽然总体上穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳平均值没有显著影响,但多重比较结果表明,穿透雨减少 30% 处理的土壤微生物量碳高于对照,这与其他研究不一致。例如 Jensen 等^[8]的研究表明完全移除降水会减少欧石楠(*Erica carnea*)灌丛土壤微生物量碳,Salamanca 等^[27]则发现降水量减少 50% 并没有对落叶阔叶林地表土壤微生物量碳产生显著影响。本研究结果可能主要与土壤异质性导致穿透雨减少 30% 的样地土壤总有机碳背景值较高有关。由于土壤微生物依赖土壤有机质以及可利用的活性有机碳维持自身生长,土壤微生物量的大小还主要取决于有机质的多少^[28],土壤微生物量碳和

土壤总有机碳之间显著的相关关系也能说明这一点 (P < 0.0001)(图 3(c))。另外,穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳较高的情况只出现在 5 月,自 2007 年 5 月初降水控制实验开始至第一次采样期间无降雨,3 种处理间的土壤含水量并没有显著差异(图 2(a)),因此 5 月的情况并不是由土壤水分的改变引起的,很可能是 5 月末土壤的冻融作用刺激了微生物活动^[29-30],促进了碳源供应充足的穿透雨减少 30% 的土壤微生物的生长。其次,土壤温度也是影响微生物量碳的因素之一^[28]。本研究中穿透雨减少 30% 的土壤温度显著高于对照,因此,也可能是减少 30% 的穿透雨量通过改变了土壤温度对土壤微生物产生了间接影响。

微生物商是个比值,与土壤微生物量碳不同,它能够消除由土壤有机质异质性引起的问题。穿透雨增加或减少 30% 对微生物商的总体影响也不显著(图 4(b))。2007 年 9 月穿透雨减少 30% 的微生物商显著低于对照和穿透雨增加 30%,采样前 48 小时内曾有明显的降水过程,说明在有降水补充后,穿透雨减少短期内可能会抑制土壤微生物获得土壤中可利用的碳。但 9 月各处理间的土壤微生物量碳并没有显著差异,这也部分印证了穿透雨减少 30% 样地土壤总有机碳背景值较高的因素可能掩盖了土壤微生物量碳对穿透雨增加或减少 30% 的响应。

2.1.3 土壤微生物量碳和微生物商对降水改变的响应

就不同处理的动态变化而言,在 2007 年生长季中,穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳及微生物商比穿透雨增加 30% 和对照的波动更大(图 5),其平均值的变幅分别为 2431.1~3541.3 mg/kg 和 1143%~

2116%, 而对照为 22016~23710 mg/kg 和 1174%~1192%, 穿透雨增加 30% 为 24911~28219 mg/kg 和 1184%~2108%。重复测定方差分析表明, 穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳和微生物商在生长季初期的 5 月最高, 生长季旺期的 7 月最低, 8 月显著升高, 9 月又再次下降(图 5)。

穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳的动态变化与次生栎林和火炬松人工林^[31]以及半干旱地区栎树林中的研究结果相似^[14]。虽然土壤微生物量碳与土壤含水量呈正相关(图 3(b)), 但其动态变化与土壤含水量变化并不完全一致(图 2(a), 图 5(a))。Wardle^[28]指出, 土壤水分、土壤温度以及植物根系生产力的相互作用及其相对重要性决定了土壤微生物量的动态变化。对照和穿透雨增加 30% 的土壤微生物量碳和微生物商没有显著的动态变化, 可能是该生长季的土壤水分动态不足以影响对照处理的土壤微生物活动, 而水分条件相对较好的穿透雨增加 30% 的处理则可能掩盖了土壤微生物量碳及微生物商的动态变化。穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳及微生物商的波动更大(图 5), 这也说明生长季内穿透雨减少将导致土壤微生物活动的较大波动。半干旱生态系统内, 分散的降水事件对干旱土壤的淋湿过程会刺激土壤微生物的活动, 引起土壤微生物量碳的动态变化^[32]。因此, 生长季降水量减少、土壤干旱程度增加很可能会导致土壤微生物量的波动加剧。

3 结论

樟子松人工林的土壤微生物量碳平均值为 26017 mg/kg, 变幅 5110~64610 mg/kg; 微生物商平均值为 1184%, 变幅 0178%~4112%, 二者都随土壤深度的增加呈下降趋势。总体上看, 穿透雨增加或减少 30% 对土壤微生物量碳及微生物商的平均值影响不显著。穿透雨减少 30% 的土壤微生物量碳及微生物商的波动幅度大于对照和穿透雨增加 30%。土壤微生物量及其动态变化受多种因素影响, 需要较长时间的进一步研究。

参考文献

- [1] IPCC. WGI Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: The physical science basis. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007
- [2] Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. Observed trends of

precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960-2000. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D08103, doi: 10. 1029/2004JD004864

- [3] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952
- [4] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, et al. Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: Design and performance of rainfall manipulation shelters. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 308-319
- [5] Hanson P J, Wullschlegel S D. North American temperate deciduous forest responses to changing precipitation regimes. New York: Springer-Verlag, 2003: 15
- [6] Harper C W, Blair J M, Fay P A, et al. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11(12): 322-334
- [7] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298: 2202-2205
- [8] Jensen K D, Beier C, Michelsen A, et al. Effects of experimental drought on microbial processes in two temperate heathlands at contrasting water conditions. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(2): 165-176
- [9] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627-1637
- [10] 何友军, 王清奎, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤微生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2292-2296
- [11] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707
- [13] Sparling G P, Feltham C W, Reynolds J, et al. Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: Use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the k_{ec}-factor. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22: 301-307
- [14] Zhang Q S, 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
- [15] Bastida F, Moreno J L, Hernandez T, et al. The long-term

- effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1-2): 53-62
- [16] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 10-13
- [17] Anderson T H, Domsch K H. Ratio of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21(4): 471-479
- [18] Bauhus J, Par D, C t L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(8): 1077-1089
- [19] Blume E, Bischoff M, Reichert J M, et al. Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season. *Applied Soil Ecology*, 2002, 20(3): 171-181
- [20] Castellazzi M S, Brookes P C, Jenkinson D S. Distribution of microbial biomass down soil profiles under regenerating woodland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(9): 1485-1489
- [21] Illeris L, Michelsen A, Jonasson S. Soil plus root respiration and microbial biomass following water, nitrogen and phosphorus application at a high arctic semi desert. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 15-29
- [22] Zak D R, Ringelberg D B, Pregitzer K S, et al. Soil microbial communities beneath *Populus grandidentata* grown under elevated atmospheric CO₂. *Ecological Applications*, 1996, 6(1): 257-262
- [23] Teesler L, Gregorich E G, Topp E. Spatial variability of soil microbial biomass measured by the fumigation extraction method and k_{EC} as affected by depth and manure application. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(10-11): 1369-1377
- [24] Anderson T H, Domsch K H. Maintenance of carbon requirements of actively-metabolizing microbial populations under in situ conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17(2): 197-203
- [25] Bardgett R D, Bowman W D, Kaufmann R, et al. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(11): 634-641
- [26] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Effects of altered water regimes on forest root systems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 117-129
- [27] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Rainfall manipulation effects on litter decomposition and the microbial biomass of the forest floor. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 271-281
- [28] Waldle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen in soil. *Biological Reviews*, 1992, 67(3): 321-358
- [29] Deluca T H, Keeney D R. Soluble carbon and nitrogen pools of prairie and cultivated soils: Seasonal variation. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 835-840
- [30] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843-2851
- [31] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 37-42
- [32] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268