

荒漠草原区不同年限柠条林表层土壤碳分布及影响因素

刘任涛, 朱 凡

(宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘 要:沙化草地种植人工林可以固定截存大气中的 C 而增加土壤 C 含量和储量,但在荒漠草原区固沙柠条(*Caragana intermedia*)林发育过程中表层土壤 C 分布规律及影响因素,尚不清楚。通过调查 6 a, 15 a, 24 a, 36 a 固沙柠条林下、林间表层土壤 C 含量和储量分布特征,结合土壤机械组成和地表植被特征调查,分析了柠条林发育过程中表层土壤 C 分布规律及其与环境因素之间的关系。结果表明:(1) 随着柠条林生长,林下表层土壤 C 含量和储量以及 C/N 均与林龄呈现单调线性回归关系($P < 0.05$)。从 6 a 到 36 a 的林地,林下表层土壤 C 含量和储量呈现单调递增趋势,而土壤 C/N 呈单调递减。24 a 生林地林下表层土壤 C 含量和储量开始显著高于林间($P < 0.01$)。(2) 随着林龄增加,林间表层土壤 C 分布变化未达到显著水平($P > 0.05$)。但是柠条林发育生长对林间具有一定辐射作用,从 24 a 到 36 a 的林地,林间表层土壤 C 含量和储量开始明显增加,林间和林下表层土壤 C 分布差异性逐渐降低。(3) 林下小尺度表层土壤 C 分布决定了整个林地表层土壤 C 分布。随着林龄增加,林地表层土壤有机碳含量和储量逐渐增加;同时表层土壤全氮的快速积累,导致土壤 C/N 无显著变化。(4) 在荒漠草原区,柠条林发育在增加林下表层土壤 C 分布的同时,对林间表层土壤 C 分布具有一定的辐射效应。在柠条林生长过程中,该林地表层土壤 C 含量和储量呈现增加趋势。

关键词:荒漠草原; 柠条林; 土壤有机碳; 土壤质地; 地表植被

中图分类号:S153.6⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0019-06

Carbon Distribution in Surface Soil and Its Impact Factors During *Caragana intermedia* Shrubland Development in Desert Steppe

LIU Ren-tao, ZHU Fan

(Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The artificial shrub planted in sandy grassland can intercept the air carbon and facilitate the soil carbon content and storage. However, the carbon distribution in surface soil and related impact factors during shrubland (*C. intermedia*) development in desert steppe were largely unknown. An investigation on surface soil carbon content and storage under the shrub and in the open was carried out in lands grown shrubs with the shrub ages of 6, 15, 24 and 36 years. By analyzing soil particle-size distribution and ground herbaceous vegetation, the surface soil carbon distribution and its relation to environmental variables were discussed. The results were as follows: (1) there was a linear regression between surface soil carbon content and storage and C/N under the shrub and stand age ($P < 0.05$), with significantly increased surface soil carbon content and storage and decreased soil C/N; (2) there was a spreading effect of stand development on surface carbon distribution in the open between shrubs, where surface soil carbon content and storage increased from 24 to 36 years of shrubland though with no significance ($P > 0.05$); (3) the surface soil carbon distribution at small scale under shrub determined the surface carbon distribution of whole stand, and surface soil carbon content and storage were enhanced for the whole stand at big scale during stand development. With the accumulation of soil nitrogen, there were no significant differences of soil C/N between these four shrublands;

收稿日期:2012-07-05

修回日期:2012-10-18

资助项目:国家科技支撑项目“荒漠草原农牧复合生态系统保育与可持续利用技术集成试验与示范”(2011BAC07B03);国家自然科学基金项目“荒漠草原土壤节肢动物多样性及分布对降雨变化的响应”(41101050);宁夏高等学校科学研究项目“干旱半干旱草地地面节肢动物多样性对放牧干扰的响应”(NJY2011021)

作者简介:刘任涛(1980—),男,河南邓州人,博士,助理研究员,主要从事干旱区土壤生态与恢复生态研究。E-mail:nmcasnw@126.com

(4) the stand development could not only facilitate surface soil carbon distribution under the shrub in desert steppe, but also have a spreading effect on surface carbon distribution in the open. This was beneficial for the enhancement of surface soil carbon content and storage of grassland ecosystems during the recovery process.

Key words: desert steppe; *C. intermedia*; soil organic carbon; soil texture; ground vegetation

草地是陆地上最重要、分布最广的生态系统之一,在全球碳循环和气候调节中起着重要作用^[1-2]。目前,由于不合理的人类活动,加之干旱的气候条件,使草地退化、沙化严重,造成土壤碳的流失,引起土壤粗化和贫瘠化。植被重建可以增加沙漠化地区土壤有机碳储量,提高土壤的生产潜力^[3]。目前在沙化草地中,植树造林和禁牧围封已成为干旱、半干旱区两种重要的碳截存方式^[4]。

当前国内外有关造林的研究多集中在沙地造林^[3,5]、退耕还林^[4]及不同造林树种^[6-7]对土壤生态系统碳储量的影响等方面。李跃林等^[7]对鹤山几种不同人工林土壤碳储量进行了研究,结果表明植树造林是增加土壤有机碳积累的有效措施,其中以营造乡土树种木荷林效果为最好。尚雯等^[5]对科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化进行了分析,发现流动沙丘造林对表层土壤 LFOC 的影响大于 SOC。陈银萍等^[8]探讨了流动沙丘造林对土壤物理组分有机碳分配的影响,发现流动沙丘造林后,轻组有机碳储量的变化比总有机碳的变化更为明显,粗沙组分中非保护性有机质的增加是引起土壤总有机碳变化的主要原因。Powers 和 Schlesinger^[9]利用空间嵌套设计试验研究了热带雨林土壤 C 分布与生物物理因素之间的关系,结果表明,海拔变化引起的环境条件变化显著影响土壤 C 储量在空间上的分布。综合分析表明,人工林建设可以促进土壤 C 含量和储量的增加,但人工林生长过程中土壤 C 储量的变化规律,尚不清楚。在退化草地上营造稳定的可持续利用的人工草地以发挥其对土壤 C 库的贡献,就需要加强人工林生长过程中土壤 C 含量和储量的研究。

柠条(*C. intermedia*)因其耐旱、耐寒、耐高温,在肥力极差、沙层含水率极低的流动沙地和丘间低地以及固定、半固定沙地上均能正常生长,已成为我国西北、华北、东北西部水土保持和固沙造林的重要树种之一^[10]。截至 2006 年,在宁夏盐池荒漠草原区已有人工柠条林 13.3 万 hm^2 。以往关于柠条林地的生态效应研究主要集中于其对土壤水分^[10]、土壤肥力^[11]和林间植被^[12]的影响,但是关于荒漠草原区柠条人工林发育过程中表层土壤 C 含量和储量变化特征的研究较少;关于柠条林发育过程中表层土壤 C

分布的影响因素,尚不清楚。

鉴于此,本文以生长年限分别为 6, 15, 24, 36 a 的柠条人工林为研究对象,通过调查林下和林间土壤机械组成和土壤 C 含量及储量,分析人工林发育过程中土壤 C 分布特征及其影响因素,旨在揭示柠条人工林发育过程对土壤 C 的截存效应,为荒漠草原区人工林建设、生态环境评估和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县境内东北部 10 km 处($37^{\circ}49'N, 107^{\circ}30'E$),属于中温带半干旱区,年平均气温 8.1°C ,最热月(7 月)平均气温 22.4°C ,最冷月(1 月)平均气温 -8.7°C ; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 990°C 。年降水量为 289 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 60% 以上,且年际变化率大,年蒸发量 2 014 mm。年无霜期为 165 d。年平均风速 2.8 m/s ,冬春风沙天气较多,每年 5 m/s 以上的扬沙达 323 次。研究区样地土壤为风沙土,植被类型为种植有大面积人工柠条林而形成的半人工草地。柠条林带间距 $5\sim 7\text{ m}$,株距 1 m 。主要草本植物包括猪毛菜(*Salsola collina*)、山苦荬(*Ixeris chinensis*)、白草(*Pennisetum centasiaticum*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)等。

该样地分布于东南向西北延伸的坡梁上,由于放牧和人为活动的影响,沙化严重。从 20 世纪 70 年代开始营造人工柠条林用于防风固沙。本文选择 1975 年、1987 年(调查年份之前已平茬过)、1996 年和 2005 年人工种植的柠条林为研究对象,每块林地面积为 $40\sim 60\text{ hm}^2$ 。自 2006 年以来宁夏回族自治区开始实施全区禁牧围封政策,草地逐渐得到恢复。目前,在 1987 和 1975 年种植的柠条林周围还分布有流动沙丘(地),面积达 $2.33\sim 2.66\text{ hm}^2$ 。

1.2 样品采集与分析

选择生长年限分别为 6, 15, 24, 36 a 的人工柠条林地为研究样地,每个样地设 3 个重复。在每个样地中设置取样点 6 个,林下和林间各 3 个。每个取样点采取五点取样法取混合土样,取样深度 $0\sim 20\text{ cm}$ 。同时,测定取样点土壤温度,用环刀法(200 cm^3)测定土壤容重(g/m^3)。混合土样带回室内风干处理后,采用 MS 2000 激光粒度仪—马尔文法测定土壤机械

组成,采用重铬酸钾氧化外加热法测定土壤有机碳(g/kg)。

在每个样地林下和林间各随机设置 6 个 1 m×1 m 草本样方,调查地表草本植被种类、密度、盖度和平均高度。在每个样地中设置 5 个 10 m×10 m 的样方调查柠条灌丛的密度、高度、冠幅、分枝数和基径。由于 24 a 样地在调查之前 2 a 已经平茬过,所以灌丛高度和冠幅较 15 a 样地低。

1.3 数据处理与统计分析

土壤 C 储量用土壤有机碳含量与土壤容重的乘积表示^[9]。所有数据采用 SPSS 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同生长年限林地间的差异,采用 2 个独立样本的 *t* 检验来比较灌丛内外的差异性,利用回归曲线分析土壤 C 分布和林龄间的关系。

2 结果与分析

2.1 植被特征

由表 1 可知,6 a 柠条林冠幅、高度、分枝数和基径均显著低于其他 3 个样地($P<0.05$)。24 a 林地

柠条冠幅、高度和基径均显著低于 15 a 和 36 a 林地($P<0.05$);除柠条冠幅 15 a 和 36 a 林间无显著差异外,柠条高度和基径均表现为 15 a 林地显著低于 36 a 林地($P<0.05$)。柠条分枝数则表现为 15 a 林地显著低于 24 a 林地($P<0.05$),而前两者均与 36 a 林地间无显著差异性($P>0.05$)。对于地表草本植被来说(表 1),随林龄增加,林间地表草本物种数呈波动变化,在 15 a 和 36 a 林地呈现双峰现象,而在 24 a 林地中出现低谷;林下地表草本物种数呈现出逐渐增加的趋势。林间和林下草本植物密度均呈现出波动增加趋势,而林间和林下地表植被盖度及高度均在较低水平上呈现波动变化。

2.2 土壤机械组成

由图 1 可见,林间和林下土壤质地差异较小,因此,不再区分林间和林下。从整个林地来看,随着林龄增加,土壤粗沙($R=-0.56, F=10.16, P<0.01$)和细沙含量($R=-0.73, F=24.70, P<0.000$)单调递减,而土壤极细粉沙($R=0.53, F=8.69, P<0.01$)和黏粉粒含量($R=0.78, F=34.97, P<0.000$)则单调递增。

表 1 柠条灌丛和地表草本植被特征

林龄/ a	柠条灌丛				地表草本			
	冠幅/m ²	高度/m	分枝数	基径/cm	物种数	密度/(株·m ⁻²)	盖度/%	高度/cm
6	0.50±0.11c	0.42±0.05d	12.83±1.33c	0.63±0.17d	6.67±0.29b	64±7b	9.81±1.69a	7.40±0.62a
15	4.13±0.74a	1.32±0.14b	23.73±3.01b	2.20±0.09b	7.00±0.45ab	156±41ab	12.54±1.66a	8.69±0.85a
24	2.03±0.10b	0.92±0.04c	36.52±4.10a	1.61±0.05c	6.72±0.46b	208±59a	14.33±3.01a	8.47±1.35a
36	4.07±0.15a	1.67±0.06a	29.54±2.54ab	2.87±0.15a	8.11±0.55a	249±80a	10.83±1.36a	6.28±0.91a

注:数据为平均值±标准误差,同列不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。

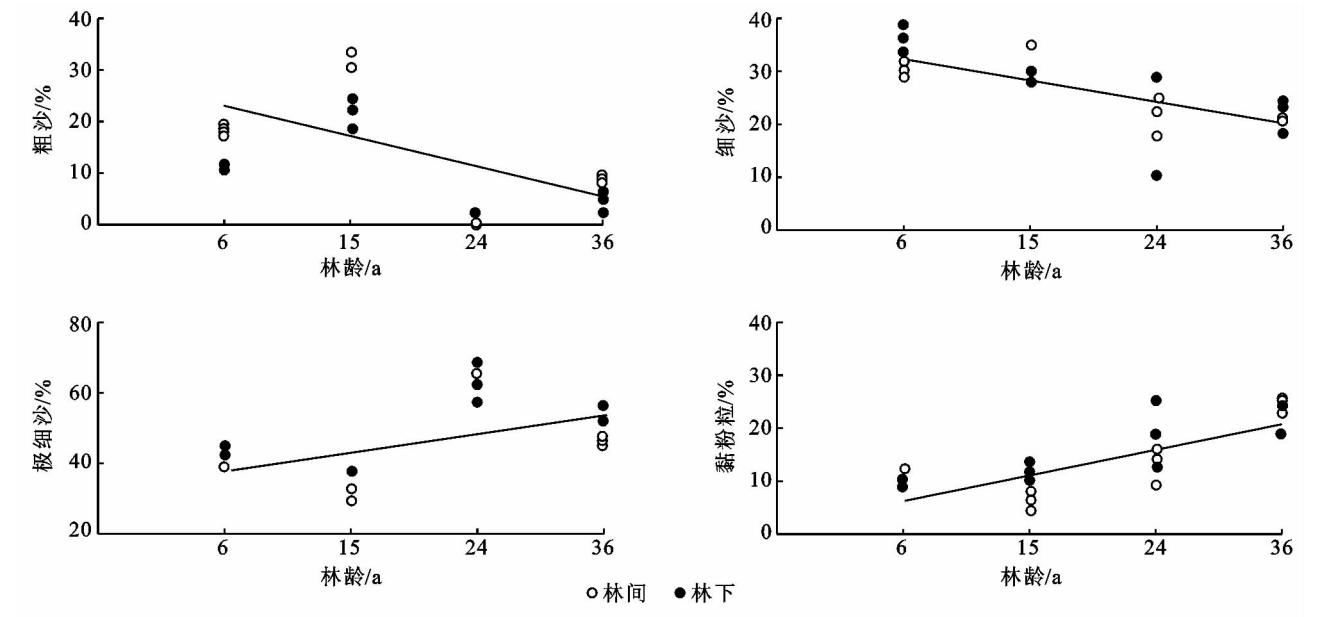


图 1 不同年龄林地土壤机械组成

2.3 表层土壤 C 含量和储量

从图 2 可以看出,随着林龄的增加,在林下,表层土壤有机碳($R=0.85, F=25.53, P<0.000$)和储量($R=0.74, F=12.26, P<0.01$)呈单调递增,表层土壤 C/N($R=-0.64, F=6.85, P<0.05$)和容重($R=-0.69, F=9.39, P<0.05$)呈单调递减;在林间,表层土壤有机碳含量、储量和 C/N 均无显著变化,而表层土壤容重呈现单调递减($R=-0.71, F=10.19, P$

<0.05)。从整体上看,随着林龄增加,柠条林地表层土壤 C 含量($R=0.59, F=11.73, P<0.01$)和储量($R=0.55, F=9.54, P<0.01$)单调增加,表层土壤容重($R=-0.41, F=4.40, P<0.05$)呈单调递减,而表层土壤 C/N 无显著变化。说明柠条林发育过程中可以增加表层土壤 C 含量和储量,降低土壤容重。虽然表层土壤 C/N 呈现出下降趋势,但和林龄间不存在线性关系。

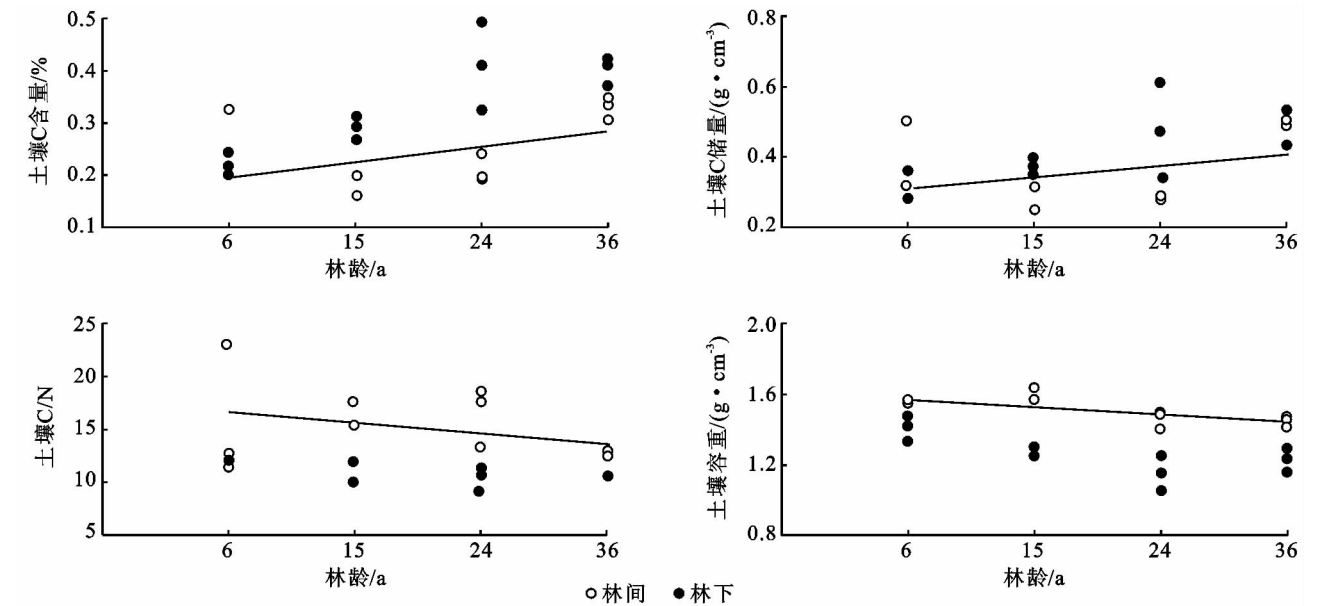


图 2 不同林龄柠条林地土壤 C 分布和土壤容重

2.4 表层土壤 C 分布与环境因子的关系

由表 2 看出,表层土壤 C 含量与柠条灌丛高度和分枝数间均存在正相关关系($P<0.05$),而表层土壤 C 储量和 C/N、柠条冠层特征间均无相关性($P>0.05$),说明柠条高度和分枝数影响着表层土壤 C 含量分布。

表 2 土壤 C 分布与柠条冠层间相关关系				
项目	冠幅/m²	高度/m	分枝数	基径/cm
土壤碳含量	0.3474	0.5669*	0.6733*	0.5502
土壤 C 储量	0.2971	0.5103	0.5132	0.4573
C/N	-0.4124	-0.5351	-0.3595	-0.4904

注: * 表示 $P<0.05$ 。

由表 3 可以看出,在林间,表层土壤有机碳含量与土壤细沙含量呈负相关($P<0.05$),而与土壤黏粉粒含量($P<0.01$)和地表草本物种数($P<0.05$)呈正相关;表层土壤有机碳储量与土壤黏粉粒含量和地表草本物种数呈正相关($P<0.05$);土壤 C/N 与土壤机械组成及地表植被特征间均无相关性($P>0.05$)。在林下,表层土壤有机碳含量与粗沙和细沙含量呈负相关($P<0.05$),而与极细沙和黏粉粒含量以及地表草本盖度间呈正相关($P<0.05$),而且表层土壤有机

碳含量与土壤极细沙含量间相关性达到显著水平($P<0.01$),土壤有机碳含量与土壤细沙和黏粉粒含量间相关性达到极显著水平($P<0.001$);表层土壤 C 储量与土壤细沙含量呈极显著负相关($P<0.01$),而与土壤极细沙和黏粉粒含量呈正相关($P<0.05$),而且表层土壤 C 储量与土壤黏粉粒含量间相关性达到极显著水平($P<0.0001$);表层土壤 C/N 比与土壤容重和细沙含量呈正相关($P<0.05$),而与土壤极细沙含量及地表草本个体数间呈负相关($P<0.05$),而且表层土壤 C/N 比与土壤容重间相关性达到显著水平($P<0.01$)。

总体而言,柠条林地表层土壤有机碳含量与土壤容重、粗沙和细沙含量呈负相关($P<0.05$),而与土壤极细沙粒和黏粉粒以及地表草本个体数呈正相关($P<0.05$),而且表层土壤有机碳含量与土壤容重间相关性达到显著水平($P<0.01$),与土壤细沙和黏粉粒间相关关系达到极显著水平($P<0.001$);表层土壤 C 储量与土壤容重、细沙含量呈现负相关($P<0.05$),而与土壤黏粉粒含量和地表草本物种数呈现显著正相关($P<0.001$),而且表层土壤 C 储量与土壤细沙含量间相关性达到显著水平($P<0.01$),

与土壤黏粉粒含量间相关性达到极显著水平($P<0.0001$);表层土壤 C/N 则和土壤容重呈显著正相关($P<0.05$)。而土壤黏粉粒间存在负相关关系($P<0.01$)。而土壤黏粉粒间存在负相关关系($P<0.05$)。

表 3 土壤 C 分布与土壤和地表草本植被间相关关系

项目	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤质地/%				地表草本			
		粗沙	细沙	极细沙	黏粉粒	物种数	密度/ (株·m ⁻²)	盖度/%	高度/cm
林下	C	-0.5579	-0.5819*	-0.9168***	0.7435**	0.9494***	0.4061	0.4720	0.6473*
	S	-0.3048	-0.4965	-0.8596**	0.6286*	0.9469***	0.3693	0.2660	0.5601
	C/N	0.7119**	0.4036	0.6864*	-0.6291*	-0.5279	-0.1653	-0.6667*	0.3511
林间	C	-0.5269	-0.3518	-0.5879*	0.1549	0.7798**	0.6421*	0.4533	-0.2959
	S	-0.4128	-0.2501	-0.4959	0.0630	0.7036*	0.6508*	0.4467	-0.3174
	C/N	0.2543	0.1110	0.3326	0.0306	-0.5111	-0.2516	-0.2066	0.3401
林地	C	-0.6854**	-0.4838*	-0.7119***	0.4526*	0.7867***	0.3916	0.4893*	0.0648
	S	-0.4128*	-0.3885	-0.6891**	0.3455	0.8046***	0.4439*	0.4008	0.0380
	C/N	0.6228**	0.2477	0.2778	-0.1467	-0.4538*	-0.1021	-0.3399	0.2749

注:C表示土壤C含量,S表示土壤C储量;*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$,***表示 $P<0.001$ 。

3 讨论与结论

随着柠条林的发育生长,柠条冠幅、高度、分枝数和基径明显增加,显著影响了地表草本植被和土壤质地特征。本研究中,随着柠条林龄的增加,林下地表草本物种数和个体数显著增加,这与林下地表草本物种数和个体数增多密切相关(表 1),反映了沙化草地生境中柠条灌丛堆形成的“资源岛”有利于柠条林下地表草本植被的生长^[13],这与科尔沁沙地中的研究结果^[14]相吻合。

同样,在柠条林地发育过程中,林间和林下表层土壤粗沙和细沙含量均呈现出单调减少,而表层土壤极细沙和黏粉含量呈现出单调增加(图 1),而且林间和林下土壤质地差异趋于减小,说明柠条林发育和灌丛堆形成有利于林下和林间表层土壤质地的改善^[14-15],且在改善林下表层土壤质地的同时,林间的表层土壤质地亦发生了变化,结果在林间亦呈现出表层土壤粗沙和细沙含量减少而表层土壤极细沙和黏粉粒含量增加的现象,林间表层土壤质地条件的改变影响了地表植被,使地表草本植物个体数随着林龄的增加而增加(图 1)。

伴随着柠条灌丛特征的改变和地表植被及土壤质地的改善,表层土壤 C 分布亦发生了显著改变(图 2)。随着林龄的增加,林下表层土壤 C 含量和储量表现出一致的变化趋势,表现为林下表层土壤 C 含量和储量随着林龄的增加而增加,说明柠条林发育生长有利于表层土壤 C 含量和储量的增加,这与前人在科尔沁沙地流动沙丘种植樟子松人工林后,表层 SOC 含量和储量显著增加,且林龄越长,SOC 含量和储量越高^[3-4]的结论相吻合。顾峰雪等^[16]对塔克拉玛干沙漠

腹地的研究发现,在流沙上建立人工植被后,土壤有机质含量显著增加,土壤肥力得到提高,并且这种变化随植被建立时间的延长而逐渐增大。

相关关系分析表明(表 2—3),柠条冠层高度和分枝数、土壤粗沙、细沙、极细沙和黏粉粒含量以及地表植被盖度影响林下表层土壤有机碳含量和碳储量的分布,而且土壤细沙、极细沙和黏粉粒含量的影响更为显著。分析其原因,发现其与柠条林地发育过程中对大气中碳的截存效应有关^[3-4]。在柠条林生长发育过程中,随柠条冠层郁闭度和地表草本植被的增加,大量极细沙和黏粉粒颗粒沉积下来,粗沙和细沙含量相对减少,同时每年有大量的枯枝落叶进入土壤,在微生物和动物的共同作用下^[15],地表凋落物及植物根系的残留物逐渐分解,使林下土壤有机质含量增加^[17]。随着林地的发育,林下土壤容重逐渐降低,这与林下土壤质地的改善有关^[15]。同时林下土壤 C/N 亦随林龄的增加而逐渐降低,说明虽然林下表层土壤有机碳含量增加,但林下表层土壤 N 的积累要快于 C 的积累,这与柠条本身是豆科植物能够固定大气中的 N 有关^[10-11]。

在柠条林间,表层土壤有机碳含量、储量和 C/N 均无显著变化,说明随着柠条林的发育生长,对林间土壤 C 分布的影响有限。但土壤容重在林间呈现出降低趋势,这与柠条林间土壤粗沙和细沙含量降低,而土壤极细沙和黏粉粒增加密切相关^[14-15]。另外,随着柠条林龄增加和林地发育,林间和林下表层土壤有机碳含量和储量差异趋于减小趋势,反映出柠条林的发育过程可以促进表层土壤 C 储量在林下和林间更为均匀分布,这与柠条林具有辐射效应有关。柠条林发育过程中林间地表植被个体数增加和土壤质地改

善(图1),增加了林间表层土壤C含量和储量,相关分析结果(表3)亦证明了这一点。除此之外,柠条根系向林间延伸亦增加了林间表层土壤有机物质的输入^[3],也可能是一个重要原因。

从整个柠条林地来看,表层土壤C含量和储量均呈现出随林地的发育而逐渐增加的趋势,说明柠条林地发育过程可以促进表层土壤有机碳含量和储量的增加。结合以上分析可知,这主要与林下表层土壤有机碳含量和储量的增加直接相关,随着柠条林地土壤质地改善和地表草本植被恢复,土壤容重逐渐降低,整个林地表层土壤有机碳含量和储量逐渐增加^[13-15]。相关分析表明,土壤容重、机械组成和地表草本个体数影响表层土壤有机碳含量的分布,土壤容重、细沙粒和黏粉粒含量及地表草本物种数影响土壤有机碳储量的分布。但表层土壤C/N随林龄增加无显著变化,说明柠条林地的36a的发育过程并未对土壤C/N产生显著影响,这是柠条林地发育过程中表层土壤有机碳增加的同时,表层土壤全氮含量亦在积累的缘故^[17-19]。

综合分析表明,在柠条林生长发育过程中,随着柠条灌丛特征的改变,地表草本植被恢复和土壤质地改善,土壤容重降低。在小尺度上,林下表层土壤C含量和储量单调增加,而表层土壤C/N单调降低;林间表层土壤有机碳含量、储量和C/N均无显著变化;而且林间与林下表层土壤C分布的差异性逐渐变小。林下小尺度表层土壤C分布决定了整个林地表层土壤C的分布。在荒漠草原区,柠条林发育在增加林下表层土壤C的分布的同时,对林间具有一定的辐射效应,可以增加林间土壤C分布,整个林地表层土壤有机碳含量和储量随着林龄的增加而增加;同时由于柠条林发育有利于表层土壤全氮的积累,导致在柠条林发育过程中土壤C/N无显著变化。

参考文献:

- [1] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [2] 张凡,祁彪,温飞,等.不同利用程度高寒干旱草地碳储量的变化特征分析[J]. *草业学报*, 2011, 20(4): 11-18.
- [3] 李玉强,赵学勇,刘新平,等.樟子松固沙林土壤碳截存及土壤呼吸对干湿变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 282-287.
- [4] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 137-147.
- [5] 尚雯,李玉强,王少昆,等.科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2069-2074.
- [6] Laik R, Kumar K, Das D K, et al. Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 71-78.
- [7] 李跃林,胡成志,张云,等.几种人工林土壤碳储量研究[J]. *福建林业科技*, 2004, 31(4): 4-7.
- [8] 陈银萍,李玉强,赵学勇,等.流动沙丘造林对土壤物理组分有机碳分配的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 1-5.
- [9] Powers J S, Schlesinger W H. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica[J]. *Geoderma*, 2002, 109(3/4): 165-190.
- [10] 蒋齐,李生宝,潘占兵,等.人工柠条灌木林营造对退化沙地改良效果的评价[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 23-27.
- [11] 张飞,陈云明,王耀凤,等.黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性质及有机质的影响[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 105-109.
- [12] 韩天丰,程积民,王惠娥.人工柠条灌丛林下草地植物群落特征研究[J]. *草地学报*, 2009, 17(2): 245-249.
- [13] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 316-321.
- [14] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 1-8.
- [15] Su Y Z, Zhang T H, Li Y L, et al. Changes in soil properties after establishment of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla* on shifting sand dunes in semiarid Horqin Sandy Land, northern China[J]. *Environmental Management*, 2005, 36(2): 272-281.
- [16] 顾峰雪,潘晓玲,潘伯荣,等.塔克拉玛干沙漠腹地人工植被土壤肥力变化[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1179-1188.
- [17] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(1): 78-85.
- [18] 张洋,刘华,王得祥,等.商洛地区不同林龄油松人工林土壤理化性质研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 82-86.
- [19] 王同顺,郭建英,孙保平,等.农牧交错区退耕还林地土壤恢复特征的研究:以内蒙古卓资县为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 134-139.