

不同退化沙地土壤碳的矿化潜力

苏永中, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:通过实验室土壤培养试验,研究了科尔沁退化沙质草地不同生境(流动沙地,半固定沙地,固定沙地和丘间低地)下土壤碳的矿化潜力及不同凋落物在沙地土壤中的分解。经 33d 的室内培养,不同生境土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的释放有极显著的差异,与生境植被盖度,凋落物积累,土壤沙化程度,土壤有机碳和全氮含量的分布有显著相关。流动沙地土壤有极低的土壤有机碳和氮的含量及其微弱的土壤微生物呼吸,表明土地沙漠化不仅导致土壤有机碳库衰竭,也使土壤微生物活性丧失。在有机质含量很低的流动沙地和半固定沙地土壤中,含氮量高的小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)凋落物比含氮量低、C/N 比高的差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)和 1 年生植物凋落物有较快的分解。在沙漠化的演变中,土壤的粗粒化,有机物质和养分及微生物活性的丧失制约着凋落物在土壤中的矿化潜力。灌木的存在使更多的有机物质和养分积聚在灌丛下,形成灌丛肥岛,因而显著贡献于碳的固存。

关键词:沙地土壤;凋落物;碳矿化;沙漠化;科尔沁沙地

Carbon mineralization potential in soils under different degraded sandy land

SU Yong-Zhong, ZHAO Ha-Lin, ZHANG Tong-Hui, ZHAO Xue-Yong (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 372~378.

Abstract: The mineralization of soil organic C is an important process regulating the functioning of natural and managed ecosystems. It controls the fluxes of the soil nutrients. In nutrient-poor sandy land ecosystem, the nutrient turnover and the energy transfer between plants and soils depends in large part on the input of litter and its mineralization in the soil. Information on sandy soil C mineralization and its response to a changing environment is therefore required for better understanding of biological feedback of desertification and the mechanism of vegetation restoration in terms of C cycling.

In this paper, we measured the potential of organic carbon mineralization in four different sandy habitats (shifting, semi-fixed, fixed sand dune and interdunal lowland) and the effects of litter addition from shrubs and annual plants on soil microbial respiration using a laboratory soil incubation experiment. Soil samples were collected from two locations: beneath and outside the canopies of shrub in each habitat. Soils were incubated for 33 days with and without litter addition. The results showed that the differences in C mineralization of soils among habitats correlated with the vegetation cover, litter accumulation, and soil structure, organic C and N contents. With the habitat transformation from the fixed sand land to the shifting sand land, 91 percent of soil organic C was lost. Soil microbial respiration in the shifting sand dune was only 8.6%~10.3% of that in fixed sand dune. This suggested that desertification strongly depleted both bulk of soil organic C and soil labile C pool. Soils amended with *Caragana microphylla* litter and annual plant litter had the greatest and the lowest microbial respiration, respectively. This might be in part attributed to the N contents and C/N ratios in litters. *Caragana microphylla* and *Artemisia halodendron* which distributed widely in Horqin sandy land played an important role not only in fixing mobile sand dune, reducing the intensity and extent of wind erosion, but also in maintaining and improving soil fertility. Shrubs created 'fertile island' with larger organic C and nutrients and microbial activity under their canopies, and therefore, contributed significantly to C sequestration.

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000048704)

收稿日期:2002-09-30; **修订日期:**2003-02-26

作者简介:苏永中(1966~),男,甘肃古浪人,博士,副研究员,主要从事土壤学和干旱区恢复生态学研究。E-mail:stnm@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: National Key Basic Research Special Foundation Project (No. G2000048704)

Received date: 2002-09-30; **Accepted date:** 2003-02-26

Biography: SU Yong-Zhong, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in soil science and restoration ecology, E-mail: stnm@ns.lzb.ac.cn

Key words: sandy soil; litter; carbon mineralization potential; desertification; Horqin sandy land

文章编号:1000-0933(2004)02-0372-07 中图分类号:S153,S154 文献标识码:A

土壤有机碳(SOC)的生物化学循环是调节生态系统功能的一个重要过程^[1],在协调土壤、植被及其周围环境的关系中起着重要的作用^[2]。SOC 及其活性作为微生物能源物质也影响着土壤养分的有效性^[3],其矿化速率控制着养分的通量^[4]。研究土壤碳的矿化及其对环境变化的响应对更好的了解生态系统演变的生物学过程有重要的意义。

土壤碳的矿化受多种因素的影响包括有机物质的化学组成^[5~7]和土壤环境条件如土壤结构^[5,8,9]、土壤温度、湿度、pH、土壤中微有机体及微生物群落特性^[10~12]等。在干旱和半干旱的沙地生态系统中,土壤资源及其微域的环境条件如水分、温度等呈高度的空间异质性分布^[13,14],更多的有机物质和养分积聚在灌丛下,形成灌丛‘肥岛’^[13,15]。这种资源的分布特性也导致了土壤碳矿化的空间异质性,进一步影响着植被的分布和系统演变的生物学过程。

在我国北方半干旱的科尔沁沙地,沙漠化的发展已导致了生境的破碎化和植被的斑块状分布,也导致了养分的贫瘠化及其分布上高度的空间异质性。沙地养分的周转及植被与土壤之间能量的转换主要依赖于一些占优势的灌木和 1 年生杂草凋落物的输入及其在土壤中的分解。然而在微生物活性极其微弱的沙质土壤中微生物的呼吸特征及凋落物在沙地土壤中的分解鲜见报导。本研究旨在通过实验室土壤培养试验,了解沙地不同生境土壤微生物呼吸及不同凋落物在不同生境土壤中的矿化潜力,从影响养分循环的土壤碳矿化角度认识沙漠化的生物学反馈和植被恢复机制。

1 研究区域自然概况与研究方法

1.1 取样地自然概况

研究是在中国科学院奈曼沙漠化研究站进行的,地处科尔沁沙地中南部内蒙古通辽市奈曼旗境内(N 42°55', E 120° 42'),属温带大陆性半干旱气候,年均温 6.4℃,≥10℃年积温 3151.2℃,无霜期 151d。年均降水量 364.6mm,主要集中在 6、7、8 三个月,年均蒸发量 1972.8mm。退化沙质草地的土壤为风沙土,疏松的结构极易遭受风蚀。

取样地为研究站附近的一块具代表性的退化沙质草地,平缓的流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘(相对高度 2~5m)和丘间低地相间分布。流动沙丘植被盖度<15%,主要种为沙米(*Agriophyllum squarrosum*),有分散的差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)分布;半固定沙丘植被盖度<30%,优势种有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和差巴嘎蒿,伴生有 1 年生的狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)和五星蒿(*Bassia hyssopifolia*)等;固定沙丘植被盖度在 50%~70%,优势种有小叶锦鸡儿,及 1 年生的黄蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草、猪毛菜和灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)等;丘间低地植被盖度>70%,优势种有小叶锦鸡儿、冷蒿(*Artemisia frigida*)、杠柳(*Periploca sepium*)等灌木和半灌木以及狗尾草、猪毛菜、黄蒿、地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、胡枝子(*Lespedeza davurica*)和扁蓿豆(*Melissitus ruthenicus*)等一些 1 年生和多年生的杂草。

1.2 取样

1.2.1 凋落物收集 选择 3 种类型的凋落物:①小叶锦鸡儿落叶,②差巴嘎蒿落叶和颖壳,③ 1 年生植物茎叶(20g 黄蒿、20g 猪毛菜和 5g 狗尾草的混合物,黄蒿和猪毛菜为群落优势种)。灌木的凋落物在叶片和颖壳枯黄落后从灌丛下收集,1 年生植物凋落物在茎叶枯黄后整株剪下。各种凋落物均为新鲜尚未分解的茎叶。凋落物经 50℃低温烘干,磨细过 2mm 筛,以备培养和化学分析。

1.2.2 土壤取样 选择流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘和丘间低地 4 个生境各 3 个样点,在每个样点分 2 个不同部位取样:小叶锦鸡儿灌丛下(A)和灌丛外(B)(流动沙丘取差巴嘎蒿灌丛下和灌丛外裸斑),取样深度 0~5 cm。每个样由 5 个随机分布的样混合而成,共 24 个样。土样装在密封的塑料袋中带回实验室,过 2mm 筛取除混入的凋落物和根后,部分土样保存在 4℃的冰箱中供培养用,部分土样风干供粒级分析和 pH、电导率(EC)的测定,进一步磨细过 0.1mm 筛的风干土用于有机碳和全氮的测定。另外在取样时用 20cm×20cm 的样方框取 0~5cm 深度的土样,过 2mm 筛分选出混入土壤的凋落物,并用水筛洗烘干后测定凋落物量。同时在每个生境的灌丛下和灌丛外用 50cm×50cm 的样方调查地上部分凋落物现在量。

1.3 分析方法

土样测定用常规分析方法^[16] 土壤含水量用烘干法,粒级分布用吸管法,pH 值(土水比 1:1)和 EC(土水比 1:5)用德国产 Multiline F/SET-3 分析仪直接测定;有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮用凯氏法(意大利产 DK6,UDK140 分析仪)。凋落物中碳、氮含量的测定方法与土壤样品同。

1.4 培养试验

碳的矿化与短期培养 土壤培养测定^[3] 将供试土样置于 250ml 的具橡皮塞的广口瓶中,内置装有 10ml 0.2mol L⁻¹浓度的 NaOH 溶液的小玻璃瓶,用以吸收有机碳分解释放出的 CO₂,通过测定 NaOH 溶液浓度的变化,计算出 CO₂-C 的释放量。每种

生境灌丛下和灌丛外土样均设 4 个处理,即不加凋落物和均匀混入 3 种烘干粉碎的凋落物处理,3 次重复,共 96 个培养瓶。土壤用量为 20g 新鲜土,加入的凋落物以 0~5cm 土层输入 0.2 kg m⁻²凋落物计,即 20g 土中加入 0.05g 凋落物。土壤湿度用蒸馏水调至其最大持水量的 60%,在 28℃ 的恒温下培养 33d,每隔 3d 取出 NaOH 溶液,用 0.2N 浓度的 HCl 滴定,计算出 CO₂-C 的释放量。土壤碳的矿化用 CO₂-C μg g⁻¹干土表示。

1.5 数据分析

用 SPSS 8.0 软件对数据进行处理。单因子方差分析(ANOVA)用于不同生境相同处理的土壤以及同一生境下不同处理的土壤碳矿化潜力的显著性检验,配对样本的 *t*-检验用于灌丛下和灌丛外土壤之间碳矿化的比较。

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤性状及土壤碳矿化的比较

不同生境下土壤中凋落物的输入,土壤粒级组成,有机碳和全氮含量,及 pH 和 EC 值有极显著的差异(*p*<0.01),流动沙地土壤有机碳和全氮含量仅是固定沙地的 7.2%~10.1%和 14.8%~17.5% (表 1)。在同一生境下,灌丛下和灌丛外土壤性状也表现出显著的差异(*p*<0.01),在灌丛下有较高的有机碳和全氮积累,表现出干旱半干旱地区典型的‘肥岛’现象。

表 1 不同生境土壤性状

Table 1 Characteristics of soils in different habitats (Means±SD, *n*=3)

生境	位置	土壤粒级分布(g kg ⁻¹)				有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	C/N 比 C/N ratio	pH (H ₂ O) 1:01	电导率 EC (μs cm ⁻¹)	含水量 soil moisture (%)	地下凋落物*	地上部凋落物
		中粗沙 Coarse sand	极细沙 Very fine sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay							Below-ground litter mass (g m ⁻²)	Above-ground litter mass (g cm ⁻²)
流动沙地①	A	972±9.2	16.4±3.3	7.2±4.2	4.4±2.2	0.42±0.04	0.078±0.006	5.38±0.12	7.75±0.05	16±1	0.72±0.03	3±4	19±6
	B	957.1±7.9	33.8±6.7	4.1±1.3	5±1.9	0.61±0.10	0.096±0.012	6.35±0.49	7.71±0.03	17±2	0.92±0.03	13±6	44±12
半固定沙地②	A	907.7±25.8	58.5±14.0	25.4±11.3	8.4±2.9	2.22±0.28	0.284±0.035	7.82±0.20	7.74±0.03	33±7	0.55±0.03	76±21	132±24
	B	883.1±18.5	75.9±9.2	34.5±9.4	6.5±1.7	2.78±0.37	0.303±0.028	9.17±0.54	7.72±0.04	51±8	0.88±0.16	198±34	268±34
固定沙地③	A	814.9±31.0	105.5±18.7	57.2±8.2	22.4±5.2	2.56±0.50	0.288±0.028	8.89±0.99	7.68±0.04	48±7	1.1±0.2	133±22	425±30
	B	777.8±29.0	135.3±25.1	70.8±13.4	16.1±4.1	3.54±0.53	0.361±0.05	9.8±0.39	7.55±0.07	52±11	2.12±0.27	320±40	526±84
丘间低地④	A	625.3±19.3	254.5±17.0	96±6.1	24.2±5.9	5.85±0.22	0.526±0.029	11.12±0.18	7.58±0.04	54±4	2.54±0.12	163±25	486±105
	B	580.1±27.5	233.2±21.7	128.6±21.4	428.1±2.37	6.05±0.45	0.549±0.027	11.02±0.47	7.25±0.18	83±18	3.07±0.34	681±133	784±100

① Mobile sand dune; ② Semifixed Sand dune; ③ Fixed sand dune; ④ Interdunal lowland; A 灌丛下 Under shrub canopy; B 灌丛外 Interspaces between shrubs; * 混入 0~5cm 土层中的凋落物数量 Litter mass incorporated into soils at 0~5 cm depth

不同生境下土壤碳的矿化以及各种凋落物在不同生境土壤中的分解有明显的差异(*p*<0.01),均表现为丘间低地 > 固定沙地 > 半固定沙地 > 流动沙地 (图 1)。不加凋落物的土壤,在 33d 的培养后,总的 CO₂-C 释放量依次为丘间低地 (552~702 CO₂-C μg g⁻¹干土) > 固定沙地 (313~575μg) > 半固定沙地 (287~354μg) > 流动沙地 (27~59μg) (图 2)。土壤碳的矿化与不同生境土壤有机碳含量、植被盖度以及凋落物输入的分布格局是一致的。在同一生境下,灌丛下土壤比灌丛外土壤有显著高的 CO₂-C 的释放 (*t*=6.8, *p*<0.01)。经 33 天的培养,加入凋落物后释放的 CO₂-C 平均为 935±326μg g⁻¹干土,比不加凋落物处理 (359±242μg g⁻¹干土)平均增加了 164%。图 1 也表明,在各种生境下,加凋落物处理在培养的每一时段碳的矿化均显著高于不加凋落物的土壤。

2.2 不同凋落物对土壤碳矿化的影响

表 2 结果表明,3 种类型的凋落物碳含量基本一致,而氮的含量小叶锦鸡儿分别是差巴嘎蒿和 1 年生草本的 2 倍和 3 倍,依此,小叶锦鸡儿凋落物有最小的 C/N 比。

3 种凋落物加入土壤后,碳的矿化在各种生境下表现为相同的变化趋势:即最初几天培养中的迅速分解以及随后缓慢而稳定的分解过程。如小叶锦鸡儿凋落物加入固定沙地灌丛下土壤中,在培养的最初 9d,释放了 696μg CO₂-C,占整个培养阶段释放总量的 57%。经 33d 的培养后,3 种类型凋落物总的呼吸量各种生境土壤表现出不同的趋势,在流动沙地和半固定沙地土壤中,3 种凋落物的分解有极显著的差异 (*F*=8.2, *p*=0.004; *F*=18.7, *p*<0.01),表现为小叶锦鸡儿 > 差巴嘎蒿 > 1 年生草本。但在固定沙地和丘间低地土壤中,3 种凋落物处理之间的差异达不到统计学的显著水平 (*F*=3.1, *p*=0.08; *F*=0.75, *p*=0.49)。从图 1 可以看出,3 种凋落物处理在不同生境土壤中分解的差异主要表现在培养的最初阶段,含氮量高的小叶锦鸡儿凋落物

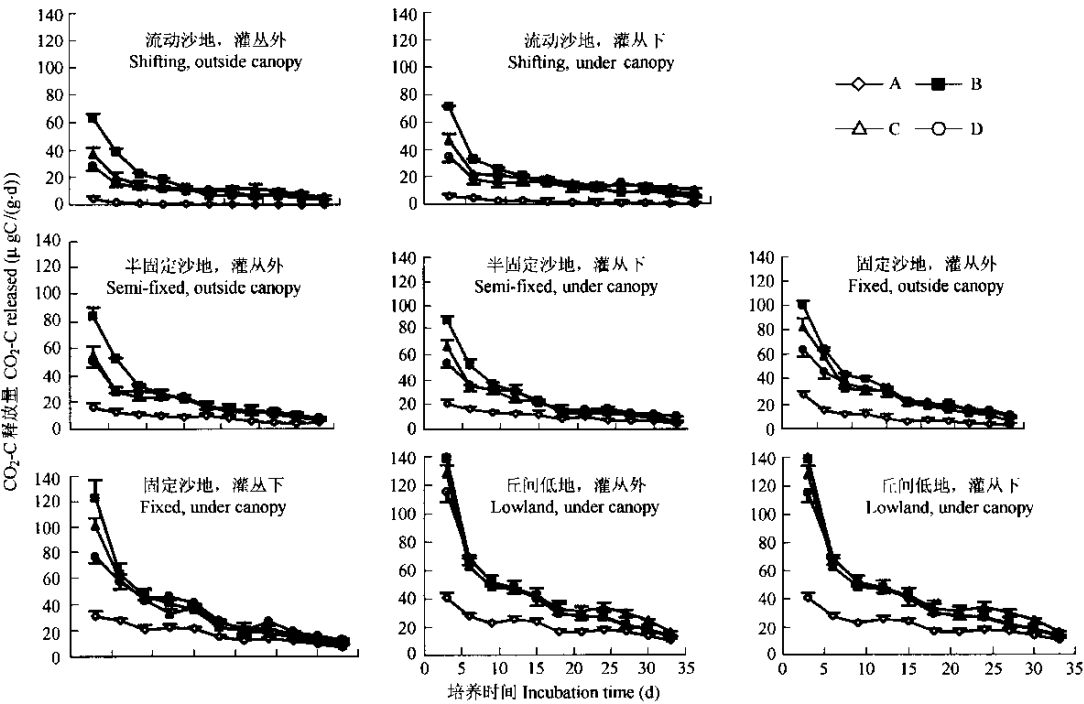


图 1 沙地不同生境土壤 33d 的培养中 CO₂-C 的释放

Fig. 1 Patterns of CO₂-C evolved during 33 days of incubation of soils from the four sandy habitats.

A 不加凋落物土壤 soil without litter; B 小叶锦鸡儿凋落物处理 *C. microphylla* litter amended soil; C 差巴嘎蒿凋落物处理 *A. halodendron* litter amended soil; D 1 年生草本凋落物处理 Annual plant litter amended soil; N=3, Bars represent one standard error of the mean

在培养的最初 6d 或 9d,其矿化量显著高于差巴嘎蒿和 1 年生草本凋落物,但在培养的以后时间,差异消失。

用常规的差减法,即用加凋落物的土壤培养测定的碳释放量减去相应不加凋落物土壤的碳释放量,可以估计出从凋落物中释放的 CO₂-C 的数量及凋落物碳的分解率。表 3 给出 3 种凋落物在不同培养时段各种生境下 CO₂-C 的平均释放量,表中的分解率为释放的 CO₂-C 占加入凋落物有机碳的百分数。可以看出,在培养的早期阶段(0~9d),从凋落物中释放的 CO₂-C,小叶锦鸡儿>差巴嘎蒿>1 年生草本,但在后期阶段(9~33d),三者之间无显著差异。在培养的 33d 中,从凋落物中释放的 CO₂-C 平均贡献了总释放量的 63%~65%,在流动沙地处理中,90%以上的 CO₂-C 来自于凋落物中 C 的释放。从分解率分析,加入的凋落物释放了 10.2~13.1mg 的 CO₂-C,占加入凋落物有机碳的 53.0%~62.9%。小叶锦鸡儿叶片有较快的分解。

3 结论和讨论

3.1 沙漠化对碳矿化的影响

在干旱半干旱的沙漠生态系统中,土壤有机质在养分的储存和保持中起着尤为重要的作用^[17]。作为微生物能源物质的有机碳含量及其矿化也决定了土壤氮、磷养分的有效性^[18]。而有机碳含量又取决于植被动态和凋落物的输入及其分解。在半干旱的科尔沁沙地系统,沙漠化的发展和逆转强烈影响着植被的动态,进而影响着有机碳的丧失和固存。研究结果表明,从固定沙地向流动沙地的沙漠化演变,91%的 SOC 丧失(表 1)。作为土壤微生物活性指标及指示土壤活性碳库的碳的矿化^[19],与 SOC

表 2 3 种类型凋落物组成和性状

Table 2 Composition and characteristics of the three types of litters

凋落物 Litters	碳 C (g kg ⁻¹)	氮 N (g kg ⁻¹)	C/N ratios
小叶锦鸡儿(叶子) <i>C. microphylla</i> (Leaves)	416	26.5	15.7
差巴嘎蒿(叶子+颖壳) <i>A. halodendron</i> (Leaves + glumes)	395	13.1	30.2
1 年生草本混合物*(茎叶) Annual plant (Leaves and stems)	385	9.7	39.7

* 20g 黄蒿、20g 猪毛菜和 5g 狗尾草的混合物 A mixture of 20g *A. scoparia* +20g *S. collina*+ 5 g *S. viridis*

的空间分布有高度的相关,经 33d 的培养,流动沙地土壤微生物呼吸量仅为固定沙地的 8.6%~10.3%。表明,土地沙漠化不仅导致有机碳库丧失,也严重恶化了土壤的生物学活性。也可以说,沙漠化是土壤碳库衰减的生物学过程。

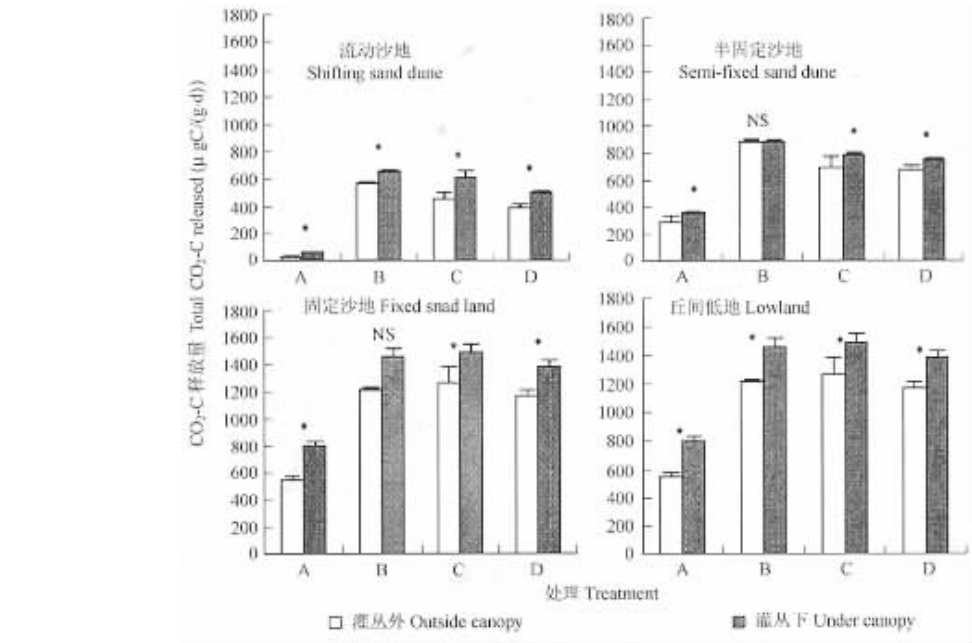


图 2 沙地不同生境土壤 33d 培养后 CO₂-C 的积累量

Fig. 2 Total of CO₂-C evolved during 33 days of incubation of soils from the four sandy habitats
A 不加凋落物土壤 soil without litter; B 小叶锦鸡儿凋落物处理 *C. microphylla* litter amended soil; C 差巴嘎蒿凋落物处理 *A. halodendron* litter amended soil; D 1 年生草本凋落物处理 Annual plant litter amended soil; * and NS 图中表示的是灌丛下和灌丛外土壤配对样本的 *t*-检验, 0.05 水平上的差异显著和不显著 Significant ($p < 0.05$) and not significant ($p > 0.05$) with paired-samples *t*-test; $N = 3$, Bars represent one standard error of the mean

表 3 不同凋落物的碳分解(占加入 C%)

Table 3 Amount of CO ₂ -C released from the decomposition of different litters (% of added C)				
	培养时段(d) Incubation periods	小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i>	差巴嘎蒿 <i>A. halodendron</i>	一年生草本 Annual forbs
凋落物 CO ₂ -C 释放量	0~9	416±59	309±97	259±99
Amount of CO ₂ -C released from litter (μg g ⁻¹)	9~33	237±61	261±52	251±49
	0~33	654±104	570±144	510±128
凋落物 CO ₂ -C 释放/总 CO ₂ -C 释放 (%)	0~9	73±11	70±11	66±12
% of total amount of CO ₂ -C (%)	9~33	54±24	61±18	60±20
	0~33	65±16	65±15	63±15
凋落物 C 分解总量	0~9	8.3±1.2 a	6.2±1.9 b	5.2±2.0 b
Decomposed amount of litter C (mg C)	9~33	4.8±1.2	5.2±1.0	5.0±1.0
	0~33	13.1±2.1 a	11.4±2.9 a	10.2±2.6 b
分解率(占加入 C %)	0~9	40.1±5.6	31.3±9.8	27.0±10.3
Decomposed rate (% of added C)	9~33	22.8±5.9	26.4±5.2	26.1±5.1
	0~33	62.9±10	57.7±14.4	53.0±13.3

3.2 土壤性状对碳矿化的影响

大量研究表明,土壤碳的矿化受土壤质地、土壤温度、湿度、pH、土壤中微生物有机体及动物区系特征等的影响^[6,8~11,19]。在控制温度和湿度条件的实验室培养下,土壤呼吸值反映了土壤中易矿化有机碳的有效性^[20]及土壤环境因素的差异^[20]。一些研究表明,土壤结构是影响有机质分解的主导因素,粘粒对土壤有机碳有很好的保护作用^[19],沙质土壤有机碳的矿化更为迅速^[8,21]。在本项研究中,土壤 DOC 的含量与土壤粘粉粒含量有极显著的相关(图 3A),但土壤已高度沙化(沙粒含量变化在 84%~99%),因而粘粉粒对 SOC 的保护作用非常有限。土壤培养的结果表明,土壤碳的矿化率(CO₂-C μg g⁻¹SOC)与土壤粘粉粒含量

- [6] Melillo J M, Aber J D, Muratore J. M. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, **63**: 621~626.
- [7] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, *et al.* Litter decomposition and nutrient release in a mixed forest of *Cunninghamia Lanceolata* and *Tsoongiodendron Odorum*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, **26**(3): 275~282.
- [8] García C, Hernández T. Organic matter in bare soils of the Mediterranean region with a semiarid climate. *Arid Soil Res. Rehab.*, 1996, **10**: 31~41.
- [9] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, **51**: 1173~1179.
- [10] Huang Y, Liu S L, Shen Q R, *et al.* Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(6): 709~714.
- [11] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol. Bioch.*, 1995, **27**: 753~760.
- [12] van der Lingden A M A, van Veen J A, Frissel M J. Modeling soil organic matter levels after long-term applications of crop residues, and farmyard and green manures. *Plant and Soil*, 1987, **101**: 21~28.
- [13] Schlesinger W H. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystem. *Ecology*, 1996, **77**(2): 364~374.
- [14] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, **247**: 1043~1048.
- [15] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Horqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 802~806.
- [16] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis Methods of Soils*. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1978. 7~59.
- [17] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *J. Arid Environ.*, 2000, **44**: 383~398.
- [18] Gallardo A, Schlesinger W H. Carbon and nitrogen limitation of soil microbial biomass in desert ecosystems. *Biogeochemistry*, 1992, **18**: 1~17.
- [19] Lin Z P, Lin X X. Characteristics of organic materials decomposition in infertile red soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1224~1230.
- [20] Mazzarino M J, Oliva L, Abril A, *et al.* Factors affecting nitrogen dynamics in a semiarid woodland (Dry Chaco, Argentina). *Plant and Soil*, 1991, **138**: 85~98.
- [21] Christensen B T. Physical fractionation of soil organic matter in primay particle size and density separates. *Adv. Soil Science*, 1992, 1~90.
- [22] Iyamuremye F, Gewin V, Dick R P, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of native agroforestry plant residues in soils of Senegal. *Arid Soil Res. Rehab.*, 2000, **14**: 359~371.
- [23] Taylor B R, Parkison D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictor of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, **70**: 97~104.
- [24] Lal R. Carbon sequestration in drylands. *Annals of Arid Zone*, 2000, **39**: 1~10.
- [25] Halvorson J J, Smith J L, Bolton H, *et al.* Defining resource islands using multiple variables and geostatistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, **59**: 1476~1487.
- [26] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of "fertile island" in the desert ecosystem. *J. Arid Environ.*, 1989, **16**: 257~262.
- [27] Aguilera L E, Gutiérrez J R, Meserve P L. Variations in soil microorganisms and nutrients underneath and outside the canopy of *Adesmia bedwellii* (Papilionaceae) shrubs in arid coastal Chile following drought and above average rainfall. *J. Arid Environ.*, 1999, **42**: 61~70.

参考文献:

- [7] 杨玉盛, 陈光水, 郭剑芬, 等. 杉木观光木混交林凋落物分解及养分释放的研究. *植物生态学报*, 2002, **26**(3): 275~282.
- [10] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. *应用生态学报*, 2002, **13**(6): 709~714.
- [15] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木和半灌木对沙地土壤肥力的影响机制. *应用生态学报*, 2002, **13**(7): 802~806.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~59.
- [19] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征. 2002, **22**(8): 1224~1230.