

腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征

张 宁, 何兴东*, 郭 畏

(南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘要: 为了揭示干旱区成土碳酸钙的形成机制, 在内蒙古阿拉善左旗境内的腾格里沙漠东缘, 选择半固定风沙土上的油蒿群落、固定风沙土上的油蒿 + 冷蒿群落和淡棕钙土上的猫头刺群落为研究对象, 3 个样地面积均为 80 m × 80 m, 每个样地内含 400 个 4 m × 4 m 的样方, 研究了沙丘固定过程中表层土壤碳酸钙与有机质的特征。研究表明, 3 个样地中, 有机质的分布格局与碳酸钙的分布格局大体相同; 土壤碳酸钙含量与土壤有机质含量均呈显著的正相关关系, 且变化趋势相同; 土壤碳酸钙空间异质性的变化与有机质空间异质性的变化具有一致性。这些结果说明土壤碳酸钙与土壤有机质之间存在一定的关联性, 这同时说明在沙丘固定过程中土壤有机质可能参与了成土碳酸钙的形成。

关键词: 沙丘固定; 植物群落; 成土碳酸钙; 土壤有机质; 空间异质性

文章编号: 1000-0933(2009)08-4094-08 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Studies on the characteristics of soil organic matter and pedogenic calcium carbonate for three kinds of soil in the Tengri Desert

ZHANG Ning, HE Xing-Dong*, WU Wei

College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4094 ~ 4101.

Abstract: Pedogenic calcium carbonate (CaCO_3) in soil in the arid and semi-arid area has become increasingly important as an indicator of plant nutrition, landscape age, paleoecology, and paleoclimate. The formation of CaCO_3 in arid soils, however, is a debating problem because it is considered as either a biotic or an abiotic process. In the biotic process, the phenomenon of biomineralization has been reported by many scientists, while little direct attention has been given to the role of soil organic matter (OM) in the formation of pedogenic carbonate. The primary objective of this study is to demonstrate whether the OM is directly involved in the formation of pedogenic carbonate. We examined the relationships between OM and CaCO_3 in *Artemisia ordosica* community on semi-fixed sandy land, *Artemisia ordosica* + *Artemisia frigida* community on fixed sandy land and *Oxytropis aciphylla* community on light brown soil land located on the eastern edge of the Tengri Desert in the League of Alashan, Inner Mongolia, China. Each of the three sampling plots is 80 m × 80 m, each of which contained 400 quadrats with 4 m × 4 m, respectively. Soil samples were taken from the upper 0 ~ 5 cm layer for each quadrat. The samples were sieved through a 0.45 mm sieve after air-dried. The OM and CaCO_3 content were determined by the potassium dichromate volumetric and aerometric methods, respectively. Three replicates were conducted for each sample, and the mean value was used for the final analysis. The index $C = s^2/\bar{u}$ ($\bar{u}$ is the mean value, s^2 : the variance) (distribution coefficient method), with the following interpretations: when $C < 1$, the pattern is uniform; $C = 1$: a random distribution and $C > 1$: a patchy distribution, was applied to determine the spatial distribution patterns of OM and CaCO_3 . Microsoft Excel and SPSS were used to analyze the regression relationships between OM and CaCO_3 contents, and Geostatistics method was used to study the spatial heterogeneities of OM and CaCO_3 based on the normalized data, so it is comparable to the spatial heterogeneities of different regionalized variables. The major findings were summarized as follows:

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2009CB421303)

收稿日期: 2008-09-25; 修订日期: 2009-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xingd@nankai.edu.cn

(1) The distributions of CaCO_3 and OM have a similar pattern to some extent. According to the results of distribution coefficient method, the OM had uniform distributions in all the three plots; CaCO_3 had a random distribution in *A. ordosica* + *A. frigida* community, and uniform distributions in both *A. ordosica* and *Oxytropis aciphylla* community. The major reason is that the plants have more patchy distribution in *A. ordosica* + *A. frigida* community than in other two communities. (2) The content of CaCO_3 was positively correlated with the content of OM, indicating that CaCO_3 contents increased with the increase in OM contents. The OM content increased from *A. ordosica* to *A. ordosica* + *A. frigida* community, but decreased from *A. ordosica* + *A. frigida* to *Oxytropis aciphylla* community, so did the CaCO_3 content. The results suggest that the OM in soil is greatly related to the pedogenic calcium carbonate. (3) To spatial heterogeneities, we analyzed the changes of sills, effective ranges, $C/(C_0 + C)$ s and fractal dimensions of OM and CaCO_3 in three sampling plots. The results showed that the effective ranges of OM and CaCO_3 decreased gradually, indicating that the homogeneity ranges of OM and CaCO_3 increased with the dune stabilization. The increase in fractal dimension of OM implied that the OM distribution tends to be more homogeneous. There was no obvious change in fractal dimension of CaCO_3 in the process of dune stabilization, indicating that the formation of CaCO_3 lagged the decomposition of OM. The increases in $C/(C_0 + C)$ s of OM and CaCO_3 suggested that their spatial autocorrelation increased in the process of dune stabilization. In general, the spatial heterogeneities of OM and CaCO_3 were concordant in the three sampling plots. Therefore, the OM and CaCO_3 were correlated with each other; the OM may be directly related to the formation of pedogenic carbonate in the process of dune stabilization.

Key Words: sand dune stabilization; plant community; pedogenic calcium carbonate (CaCO_3); organic matter (OM); spatial heterogeneity

碳酸钙普遍存在于干旱区和半干旱区的土壤中,它对植物的营养、碳的沉积、景观年龄、古气候学和古生态学的研究都有重要意义^[1]。干旱区成土碳酸钙的形成机制是一个有争议的问题,有些学者认为它是非生物的过程^[2,3],而有些学者认为它是生物的过程^[4~7]。但随着研究的不断深入,人们已经认识到成土碳酸钙的形成不是一个单纯的物理过程,生物也在成土碳酸钙形成过程中起着较大的作用^[5,6]。

在生物的过程中,与土壤有机质有关的碳酸钙来自三方面的生物矿化:植物体地上部^[4,8~10]、土壤微生物^[5,6]以及植物根系^[11]。理论上,有机质分解后释放碳酸钙,土壤有机质在成土碳酸钙的形成中起重要作用,但这需要野外试验加以证实。

油蒿(*Artemisia ordosica*)是我国西北干旱、半干旱区沙地的主要建群种。在沙丘固定过程中,油蒿群落经历半固定沙地、固定沙地、生草沙地 3 个阶段^[12],在这一过程中,土壤有机质含量和碳酸钙含量均发生显著变化^[13,14]。因而,如果干旱区成土碳酸钙的形成以生物过程为主,那么成土碳酸钙应主要来自土壤有机质,即二者之间存在正相关关系。为此,在内蒙古阿拉善境内腾格里沙漠东缘,选择半固定风沙土上的油蒿群落、固定风沙土上的油蒿 + 冷蒿(*A. frigida*)群落和淡棕钙土上的猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)群落为研究对象,分析了干旱区沙丘固定过程中土壤有机质和碳酸钙两者之间的关系,以探讨干旱区成土碳酸钙的形成机制。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古阿拉善境内的腾格里沙漠东缘,海拔 1420 m,气候属干旱区,年均气温 8℃,平均年较差 30.5℃,年降水量 80 ~ 150 mm 且主要集中在 7 ~ 9 月份(占年降水量的 65.3%),年蒸发量 3000 ~ 4000 mm,年均风速 3.1 m·s⁻¹,以西北风为主。地带性土壤属淡棕钙土,地带性植被属半荒漠。

在研究区中,选择半固定风沙土上的油蒿群落、固定风沙土上的油蒿 + 冷蒿群落和淡棕钙土上的猫头刺群落为研究对象。在油蒿群落中,植物主要是油蒿。在油蒿 + 冷蒿群落中,油蒿和冷蒿占绝对优势,400 个样方中 355 个只有油蒿或冷蒿或二者,另外 37 个样方中伴生植物的总盖度仅为 0.5% ~ 2%,而其余 8 个伴生植

物的总盖度为 2% ~ 10%。伴生植物主要有画眉草 (*Eragrostis pilosa*)、硬阿魏 (*Ferula bungeana*)、黄蒿 (*A. scoparia*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、沙生针茅 (*Stipa glareosa*) 和沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 等。在猫头刺群落中,猫头刺为优势种,主要伴生物种为狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla*) 和骆驼蓬 (*Peganum harmala*)。

1.2 研究方法

3 个样地面积均为 80 m × 80 m。样地内设 4 m × 4 m 样方 20 × 20 个,共 400 个。在每个样方内,采集 0 ~ 5 cm 土样带回实验室风干。土样过 40 目筛后,用重铬酸钾容量法(外加热法)测定土壤有机质含量,气量法测定土壤 CaCO₃ 含量。实验共测定 1200 个土样的有机质含量和碳酸钙含量,每个指标 3 个测定重复。

在本项研究中,土壤有机质含量和碳酸钙含量分布格局判定借鉴植物种群分布格局判定方法中的分布系数法,统计量为: $C = s^2/\bar{u}$ ($\bar{u}$ 为均值, s^2 为方差),定义:当 $C < 1$,属于均匀分布; $C = 1$,属于随机分布; $C > 1$,属于小斑块分布。

在 Excel 和 SPSS 软件上,对有机质含量和碳酸钙含量之间的关系进行回归。

进行空间异质性分析时,为了使不同样地变异函数的相同参数具可比性,对测定的土壤有机质和碳酸钙含量的数据都进行归一化处理^[15,16] (某一属性所有区域化变量除以该属性最大的变量值),然后用地统计学方法计算其空间异质性特征。变异函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 是变异函数, h 为两样本间的分离距离, $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为随机变量 z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 为在分离距离为 h 时的样本对总数。分形维数 (D) 用公式 $D = (4 - m)/2$ 计算,式中 m 为 $2\gamma(h) = h^{(4-2D)}$ 双对数回归直线的斜率。

根据 GS⁺ Win 5 软件的计算结果,比较分析土壤有机质和碳酸钙的空间异质性。其中,块金值 (C_0) 为空间距离为零时变异函数的值;基台值 ($C + C_0$) 是系统或系统属性最大的变异,它可衡量不同变量的空间异质性大小;空间异质性比 [$C/(C + C_0)$] 是空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的比例,此值越大,空间自相关性越强;分形维数表示变异函数曲线的曲率大小,该值越接近 2,表明越同质。

变程表示空间相关尺度,当采样间隔距离大于变程时,表明空间自相关性消失或者说变量与空间不相关。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质和碳酸钙含量的空间分布

从图 1 看,在半固定沙地油蒿群落中或在淡棕钙土猫头刺群落中,土壤有机质和碳酸钙分布的集散程度均有一定程度的相似性,土壤有机质含量高的区域,碳酸钙的含量也较高。根据扩散系数法计算结果表明(表 1),在所研究的 3 个样地中,有机质都为均匀分布;在油蒿群落和猫头刺群落中,碳酸钙为均匀分布,而在油蒿 + 冷蒿群落中,碳酸钙为随机分布。

表 1 样地中土壤有机质和碳酸钙的分布格局

Table 1 Distribution patterns of organic matter and calcium carbonate in soil

属性 Attribute	样地 Sample	样方数 Number	平均值 Mean	方差 Variance	分布系数 Distribution coefficient	分布格局 Distribution pattern
有机质含量 Organic matter contents (g·kg ⁻¹)	A	400	1.04	0.07	0.07	均匀分布 Uniform
	B	400	3.65	1.55	0.43	均匀分布 Uniform
	C	400	2.41	0.17	0.07	均匀分布 Uniform
碳酸钙含量 Calcium carbonate contents (g·kg ⁻¹)	A	400	17.72	6.92	0.39	均匀分布 Uniform
	B	400	25.16	23.16	0.92	随机分布 Random
	C	400	15.97	8.19	0.51	均匀分布 Uniform

A: 油蒿群落 *Artemisia ordosica* community; B: 油蒿 + 冷蒿群落 *A. ordosica* + *A. frigida* community; C: 猫头刺群落 *Oxytropis aciphylla* community; 下同 the same below

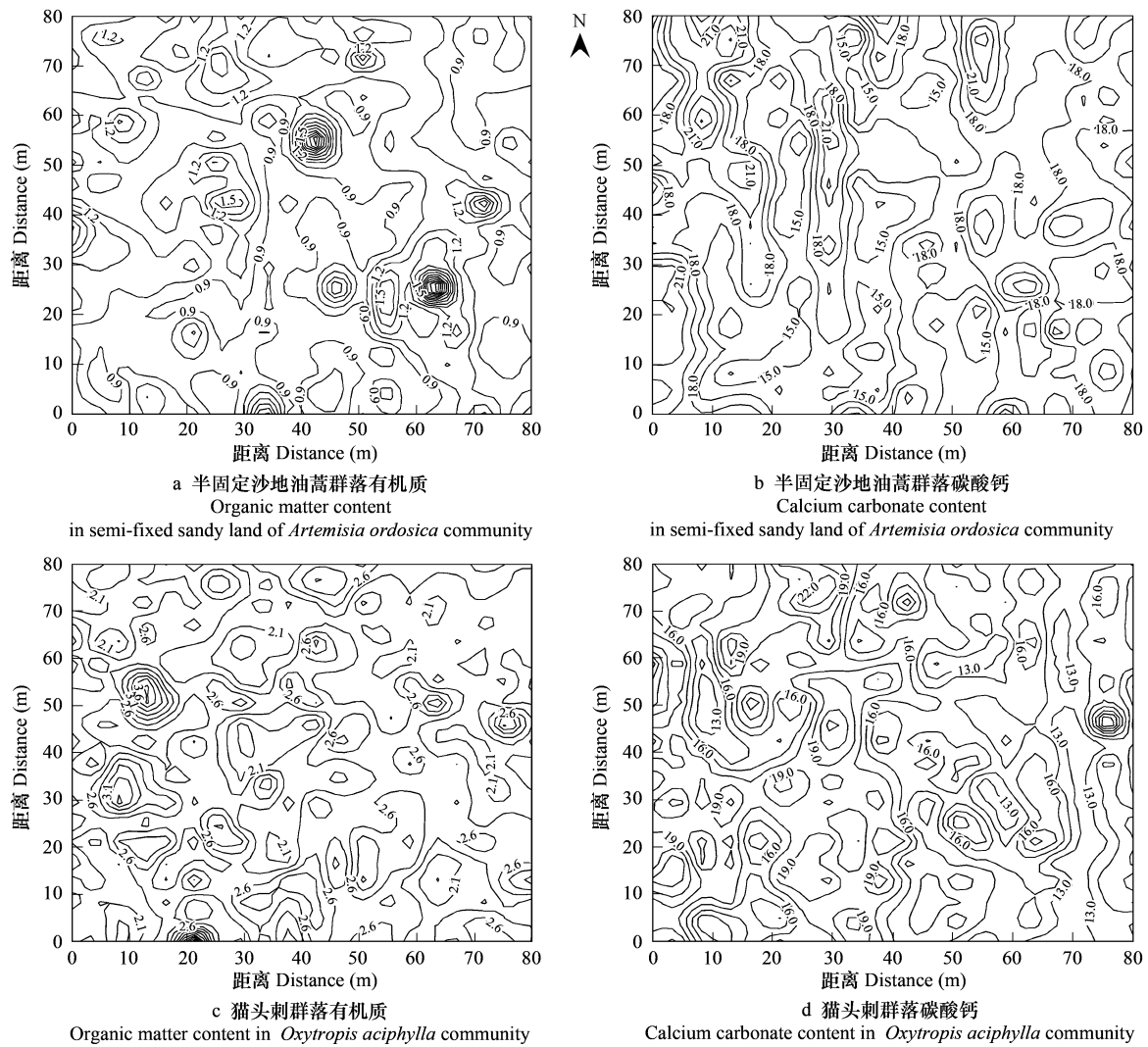


图 1 土壤有机质和碳酸钙的空间分布

Fig.1 Spatial distributions of the organic matter and the calcium carbonate in soil

2.2 土壤有机质和碳酸钙含量的变化及其之间的关系

图 2 表明,从油蒿群落油蒿 + 冷蒿群落再到猫头刺群落,有机质和碳酸钙的含量都是先增加后减少,总体变化趋势与生物量的变化趋势相同。但有机质和碳酸钙的含量的变化又有不同,有机质含量的变化是油蒿群落低于猫头刺群落,二者低于油蒿 + 冷蒿群落;而碳酸钙含量的变化则是猫头刺群落低于油蒿群落,二者低于油蒿 + 冷蒿群落。猫头刺群落有机质的含量大于油蒿群落,而碳酸钙含量却小于油蒿群落,这主要是由于半固定风沙土土质疏松,土壤水分条件较好,有机质分解较快,有利于碳酸钙的释放;而在猫头刺群落中,土壤紧实,土壤水分条件较差,透气性差,有机质的分解受阻,因而形成的碳酸钙较少。

描述统计结果表明(表 2),从油蒿群落到油蒿 + 冷蒿群落到猫头刺群落,无论是有机质含量还是碳酸钙含

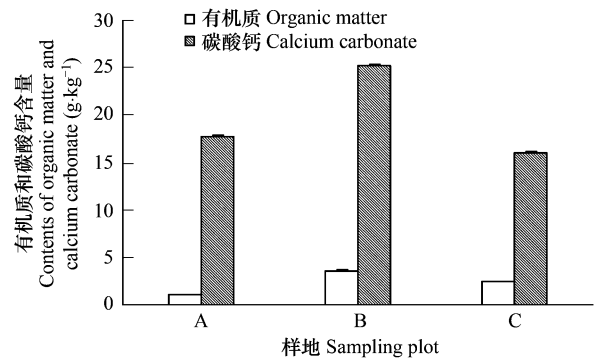


图 2 样地中有机质和碳酸钙含量的变化

Fig. 2 Changes of organic matter contents and calcium carbonate contents in soil

量,其变异系数都是先增大后减小,即油蒿+冷蒿群落中有机质和碳酸钙含量的变异系数最大。从表1中可以看出,在3个群落中,油蒿+冷蒿群落内有机质和碳酸钙的分布系数最大,表明该群落内有机质和碳酸钙分布的集中度较高,因而导致该群落内有机质和碳酸钙在二维尺度下变异系数较大。这种现象同时说明,土壤有机质含量越高,碳酸钙含量越高。

表2 样地中土壤有机质和碳酸钙的描述统计
Table 2 Descriptive statistics of organic matter and calcium carbonate in soil

属性 Attribute	样地 Sample	处理 Treats	样方数 Number	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation	峰值 Kurt	偏斜度 Skew	变异系数 Variance coefficient (%)
有机质含量 Organic matter contents (g·kg ⁻¹)	A	a	400	1.04	0.59	3.37	0.01	0.27	20.05	3.19	25.77
		b	400	0.31	0.18	1.00	0.00	0.08	20.05	3.19	25.77
	B	a	400	3.65	1.25	9.27	0.06	1.25	1.48	1.03	34.15
		b	400	0.39	0.14	1.00	0.01	0.13	1.48	1.03	34.15
	C	a	400	2.41	1.49	5.17	0.02	0.41	5.91	1.53	16.98
		b	400	0.47	0.29	1.00	0.00	0.08	5.91	1.53	16.98
碳酸钙含量 Calcium carbonate contents (g·kg ⁻¹)	A	a	400	17.72	9.86	26.21	0.13	2.63	0.22	0.44	14.85
		b	400	0.68	0.38	1.00	0.01	0.10	0.22	0.44	14.85
	B	a	400	25.16	12.17	39.23	0.24	4.81	-0.32	0.19	19.13
		b	400	0.64	0.31	1.00	0.01	0.12	-0.32	0.19	19.13
	C	a	400	15.97	10.59	26.80	0.14	2.86	0.06	0.51	17.92
		b	400	0.60	0.40	1.00	0.01	0.11	0.06	0.51	17.92

a 原数据 Original data, b 归一化数据 Normalized data

回归分析结果表明(图3),在3个样地中,碳酸钙含量与有机质含量都呈显著的正相关关系,即碳酸钙的含量均随有机质含量的增加而增加。一方面,土壤有机质的主要来源是枯枝落叶的凋落分解,植物的地上部组织中含有碳酸钙,所以碳酸钙的含量随有机质含量的增加而增加;另一方面,有机质含量丰富的土壤中,微生物的数量多,活性大,而微生物能够分解有机质释放碳酸钙,这也导致碳酸钙的含量随有机质含量的增加而增加。

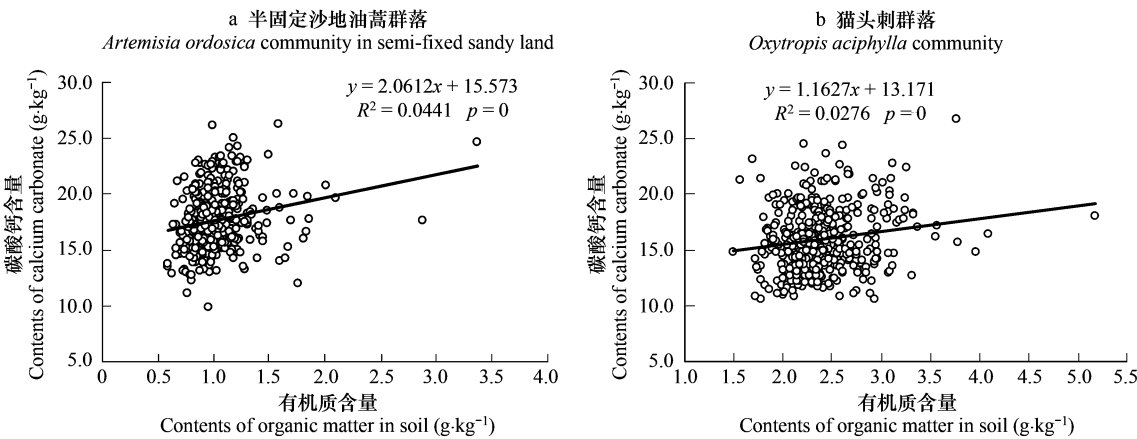


图3 油蒿群落和猫头刺群落有机质与碳酸钙含量的关系

Fig. 3 The relationships between organic matter contents and calcium carbonate contents in *Artemisia ordosica* community and in *Oxytropis aciphylla* community

2.3 区域化变量的空间结构特征

3个样地的空间异质性计算结果表明(图4),土壤有机质和碳酸钙的有效变程逐渐减小,说明在沙丘固

定过程中有机质和碳酸钙的同质范围在增大,这主要是植物长期定居的结果。从基台值的变化来看,有机质和碳酸钙的空间异质性没有明显的变化规律,但分形维数却表现出一定的变化规律,从油蒿群落到油蒿 + 冷蒿群落到猫头刺群落,有机质的分形维数逐渐增大,说明有机质的空间变异逐渐趋于同质,碳酸钙的分形维数变化不大,这也体现了有机质分解释放碳酸钙的滞后性。有机质的空间异质性比呈现出先增大后减小的趋势,说明有机质由空间自相关引起的空间异质性表现为先增大后减小;碳酸钙的空间异质性比逐渐增大,说明碳酸钙由空间自相关引起的空间异质性逐渐增大。总体上,3 个群落内有机质和碳酸钙的有效变程、分形维数和空间异质性比都体现出相同的变化规律,这说明有机质和碳酸钙的在空间分布上具有一致性,进而说明沙丘固定过程中有机质和碳酸钙之间的依赖性。

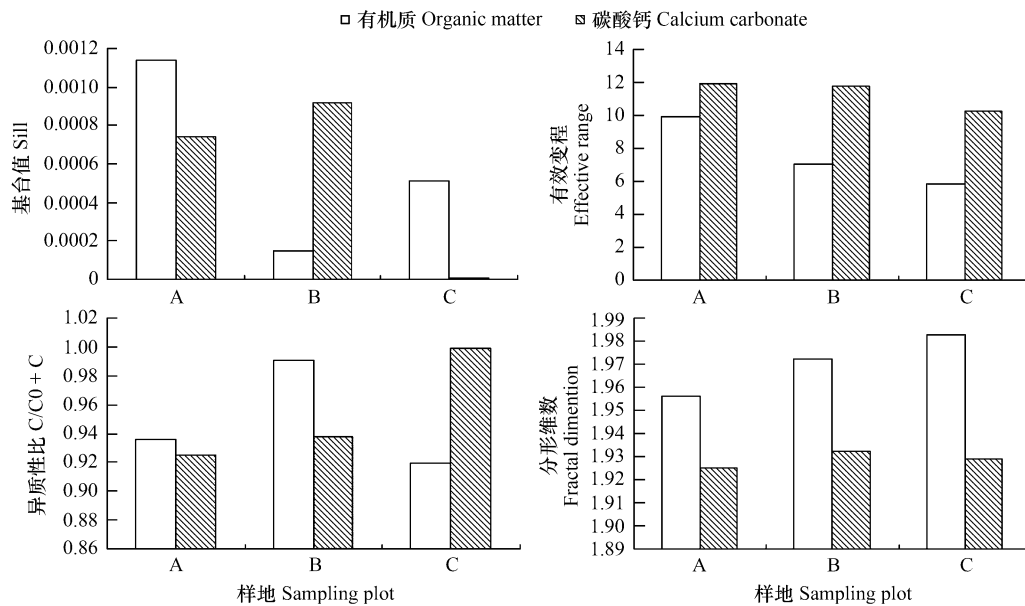


图 4 土壤有机质和碳酸钙的空间异质性

Fig. 4 Spatial heterogeneities of organic matter and calcium carbonate in soil

3 讨论

成土碳酸钙的形成机制比较复杂, Monger 将其归为 4 类: 单元上升模型、单元下降模型、就地模型和生物模型^[1]。事实上, 关于碳酸钙形成机制的争论已经持续一个多世纪。对于 calcrete 这个词, 有的学者指的是分布范围广泛而且坚硬的石灰质岩层^[17], 有的学者指的是少量碳酸钙的积累^[18], 其实 calcrete 这个词的最初意思是指碳酸钙的沉积层^[19], 而目前人们所讨论的成土碳酸钙指的是 pedogenic carbonate^[1]。围绕成土碳酸钙的形成机制, 过去有很多学者认为成土碳酸钙是一个非生物的过程, 即随着土壤的干旱水溶性的碳酸钙逐渐结晶形成^[2, 3], 或岩石风化促进成土碳酸钙的积累^[20], 而且通过建立数学模型来模拟钙积层的形成^[21~24]。但是, Ruhe 的计算结果表明^[25], 母岩中没有形成大量碳酸钙所需要的钙元素; 即使母岩中含有充足的钙元素, 也只有极少量的被风化释放出来。此外, Gile 等^[26]曾经认为大气降尘是成土碳酸钙的来源, 为了验证这一假说是否正确, 他进行了 10a 的野外实验, 结果表明, 空气降尘中的碳酸钙为 $0.35 \sim 0.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 这说明大气降尘确实能够增加土壤中的碳酸钙含量, 但是其量甚微。结果表明, 非生物的过程是成土碳酸钙的形成机制之一, 但并不能排除生物的形成过程。2004 ~ 2006 年考察中发现, 在油蒿群落的演替中, 油蒿无论是被驼绒藜 (*Ceratoides arborescens*) 所替代还是被冷蒿所替代, 20 ~ 40 cm 土层中都出现了紧实的钙积层。基于均质风成沙的油蒿群落, 土壤中的成土碳酸钙从何而来。本文从土壤有机质入手来探讨土壤碳酸钙的形成机制。

土壤有机质是土壤基质变化的基础。土壤有机质主要源于植物凋落物和植物根系^[27]。对于本项研究而

言,表层土壤的有机质主要来源是植物的凋落物。在沙丘固定过程中,有机质的含量先增大后减小,这是因为油蒿群落和猫头刺群落的植被盖度小于油蒿+冷蒿群落,而且油蒿和冷蒿是半灌木,形体较大,猫头刺为强旱生小灌木,形体矮小^[28],植被高度和覆盖度的变化,会导致土壤有机质含量降低^[29]。那么,有机质含量的变化是否会影响成土碳酸钙的含量?乌力更等^[30]研究表明,内蒙古均腐土中大约有 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的碳酸钙来自有机碳的分解。雷文进等^[31]报道,新疆干旱土表层中,有机残体分解产生的碳参与了新淀积方解石的形成,且每年植物残体的分解率为 80%~90%,其矿化速率是湿润土壤中的 5~10 倍。段建南等^[24]报道,有机质分解时释放出来的钙,部分被植物重新吸收,如果条件适宜,部分钙离子可以形成碳酸钙。本项研究结果表明,在沙丘固定过程中的 3 个典型样地中,表层土壤碳酸钙的含量均随有机质含量的增加而增加,两者呈显著的正相关关系,与他们的研究结果一致。显然,有机质的积累为土壤碳酸钙的形成创造了条件。

有机质分解后直接释放碳酸钙吗?有研究证实,植物地上部组织中的确含有碳酸钙^[8~10],且这些碳酸钙以钟乳体的形式存在于植物的晶细胞中。Okazaki 等^[4]指出,据钟乳体的体积和数量所计算出的植物叶中碳酸钙含量大约为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,最高值达 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。Phillips^[11]指出,碳酸钙晶体在围绕根毛的粘套内形成。显微实验结果表明,所研究的植物体中,含有更多的是草酸钙而不是碳酸钙,理论上,高温时,有机质中的草酸钙就转化为碳酸钙。当植物的枯枝落叶分解返回到土壤中后,有机质中的碳酸钙确实返回到土壤中参与成土碳酸钙的形成。同时,有机质含量的变化会影响土壤微生物的数量和活性进而影响有机质的分解速率。Monger^[6]研究认为,在典型荒漠中,微生物通过分解各种形态的有机质而释放出碳酸钙。当土壤有机质含量变化时,土壤碳酸钙的含量也会变化。在沙丘固定过程中,碳酸钙的含量呈现先增加后减小的趋势,与有机质的变化趋势相同。可见,有机质的变化不仅影响碳酸钙的来源而且影响其累积速度。

另一方面,土壤资源空间异质性是干旱、半干旱区的一种普遍现象^[32~34]。在西北干旱区植物灌丛的存在会导致土壤有机质在灌丛下的富集。在沙丘固定过程中,有机质的空间异质性有减小的趋势。由于土壤有机质的空间异质性可以预测微生物的空间异质性^[34],由此可以推测在此过程中土壤微生物的空间异质性在减小。由于微生物能够分解有机质释放碳酸钙,碳酸钙的空间异质性也应有减小的趋势,实验结果也表明,碳酸钙的空间异质性确有减小的趋势。所以碳酸钙空间异质性的变化是有机质空间异质性的变化造成的。

总之,干旱区成土碳酸钙与有机质具有密切关系,有机质是成土碳酸钙形成的基础之一。

References:

- [1] Monger H C. Pedogenic carbonate: links between biotic and abiotic CaCO_3 . 17th WCSS, Thailand, 2002. 14—21.
- [2] Jenny H. Calcium in the soil III. Pedologic relations. Soil Science Society of America Proceedings, 1941, 6: 27—37.
- [3] Doner H E, Lynn W C. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals. In: Dixon J B, Weed S B. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 1989. 279—324.
- [4] Okazaki M, Setoguchi H, Aoki H, et al. Application of soft X-ray microradiography to observation of cystoliths in the leaves of various higher plants. Journal of Plant Research, 1986, 99: 281—287.
- [5] Wright V P. The role of fungal biomineralization in the formation of Early Carboniferous soil fabrics. Sedimentology, 1986, 33: 831—838.
- [6] Monger H C, Daugherty L A, Lindemann W C. Microbial precipitation of pedogenic calcite. Geology, 1991, 19: 997—1000.
- [7] Liu X, Monger H C, Whitford W G. Calcium carbonate in termite galleries-biomineralization or upward transport? Biogeochemistry, 2007, 82: 241—250.
- [8] Miao L L, Yen T B, Kuo L L. Formation of calcium carbonate deposition in the cotyledons during the germination of *Justicia procumbens* L. (Acanthaceae) seeds. Taiwan, 2004, 49: 250—262.
- [9] Borowitzka M A. Calcification in aquatic plants. Plant Cell Environment, 1984, (7): 457—466.
- [10] Arnott H J. Calcium Carbonates in Higher Plants. In: Omori I M, Watabe N. Mechanisms of Biomineralization in Animals and Plants. Tokyo: Tokai Univ Press, 1980. 211—218.
- [11] Phillips S E, Milnes A R, Foster R C, et al. Calcified filaments: an example of biological influences in the formation of calcretes in South Australia. Australian J Soil Res, 1987, 25: 405—428.
- [12] Zhao X L. Discussion on Sand-fixing Plants in Shapotou Area. In: Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou. Study on Controlling Shifting Sand in Tengri Desert (2nd). Yinchuan: Ningxia People Press, 1991. 27—57.
- [13] Duan Z H, Xiao H L. Fractionation and availability of soil inorganic phosphorus in sand soil and improved one. Journal of Desert Research, 2001,

- 21(2): 195—199.
- [14] Xiao H L, Duan Z H, Li X R, *et al.* Succession of plant-soil system in the process of mobile dunes stabilization. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(6): 605—611.
- [15] Xue P P, He X D, Gao Y B, *et al.* Study on growth plasticity of *Agriophyllum squarrosum*: a pioneer species of plant on sand dune. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 284—288.
- [16] Hu X, Wang H T, Lu J G, *et al.* Response of *Artemisia ordosica* population to spatial heterogeneity of soil in arid and semiarid regions. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 588—592.
- [17] Hirmas D R, Allen B L. Degradation of pedogenic calcretes in West Texas. *Soil Sci Soc*, 2007, 71(6): 1878—1888.
- [18] Vogt T, Del Valle H F. Calcretes and rryogenic structures in the area of Puerto Madryn (Chubut, Patagonia, Argentina): *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 1994, 76(1/2): 57—75.
- [19] Lamplugh G W. Calcrete. *Geol Magazine*, 1902, 9: 575.
- [20] Xu Q G, Huang R H. *Soil Geography*. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [21] Arkley R J. Calculation of carbonate and water movement in soil from climatic data. *Soil Sci*, 1963, 96: 239—248.
- [22] Marcoux L S. Adiffusion model fou caliche formation. In: Reeves C C Jr. ed. *Caliche Origin, Classification, Morphology, and Uses*. Lubbock, Tex., :Estacado, 1976. 182—191.
- [23] Ahmad I. A water budget approach to the prediction of caliche depths. *Publ Climatol*, 1978, 31:1—53.
- [24] Duan J N, Li B G, Shi Y C, *et al.* Modekong of soil CaCO₃ deposition process in arid areas. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 318—326.
- [25] Ruhe R V. Geomorphic surfaces and surficial deposits in southern New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and mineral resources. *Mem*, 1967, 18: 65.
- [26] Gile L H, Peterson F F, Grossman R B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Sci*, 1966, 101: 347—360.
- [27] Zhang Q F, You W H, Song Y C. Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 19—22.
- [28] Zeng Y J, Wang Y R, Zhang B L, *et al.* Eco-adaptability studies of seed germination in species of *Reaumuria soongorica* and *Oxytropis aciphylla*. *Acta Pratacultural Science*, 2000, 9(3): 36—42.
- [29] Fan Y, Liu S Q, Zhang S R, *et al.* Background organic carbon storage of topsoil and whole profile of soils from Tibet district and their spatial distribution. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2834—2846.
- [30] Wu L G, Li X, Chen X Y. Historical Evolution of Inner Mongolia HeiLu soil Since Holocene. In: Lu J G. *Soil Geology, the fourth*. Beijing: Agricultural Press, 1997. 27—32.
- [31] Lei W J, Gu G A. Soil Diagnostic Horizons of Dryland Soil in China. In: Gong Z T. *Soil Taxonomy, Colletion B, Chinese Soil Taxonomy*. Beijing: Science Press, 1992. 73—98.
- [32] Wezel J L, Rajot C H. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(4): 383—398.
- [33] William H S, James F R, Gary L, *et al.* Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247: 1043—1048.
- [34] Herman R P, Kerrir R P, Johannie H M, *et al.* Resource islands predict the distribution of heterotrophic bacteria in Chihuahuan Desert soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(5): 1816—1821.

参考文献:

- [12] 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨. 见:中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究(二). 银川:宁夏人民出版社, 1991. 27~57.
- [13] 段争虎, 肖洪浪. 流沙和改良后土壤无机磷形态分级及其有效性研究. *中国沙漠*, 2001, 21(2): 195~199.
- [14] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤——植被系统演变. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 605~611.
- [15] 薛苹苹, 何兴东, 高玉葆, 等. 沙丘先锋植物——沙蓬生长可塑性的研究. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 284~288.
- [16] 胡旭, 王海涛, 卢建国, 等. 干旱和半干旱区油蒿对土壤空间异质性的响应. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 588~592.
- [20] 徐启刚, 黄润华. *土壤地理学教程*. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [24] 段建南, 李保国, 石元春, 等. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟. *土壤学报*, 1999, 36(3): 318~326.
- [27] 张庆费, 由文辉, 宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 19~22.
- [28] 曾彦军, 王彦荣, 张宝林, 等. 红砂和猫头刺种子萌发生态适应性的研究. *草业学报*, 2000, 9(3): 36~42.
- [29] 范宇, 刘世全, 张世熔, 等. 西藏地区土壤表层和全剖面背景有机碳库及其空间分布. *生态学报*, 2006, 26(9): 2834~2846.
- [30] 乌力更. 全新世以来内蒙古黑垆土的历史演变. 见: 陆景冈. *土壤地质. 第四辑*. 北京: 中国农业出版社, 1997. 27~32.
- [31] 雷文进, 顾国安. 中国干旱土发生及主要诊断层划分依据. 见: 龚子同. *土壤系统分类研究. B 辑. 中国土壤系统分类探索*. 北京: 科学出版社, 1992. 73~98.