

干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律

贾晓红 李新荣 李元寿

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000)

摘 要 测定了干旱沙区不同年限植被恢复区土壤 0~5 (包括结皮层)、5~10 和 10~20 cm 颗粒组成分布、土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和全氮含量,并分析了土壤颗粒组成分布中沙粒和粘粉粒含量变化与土壤 SOC 和氮含量间的关系,探讨植被恢复过程中 SOC 和氮变化规律。研究表明,干旱沙区植被恢复过程中, SOC 和全氮含量存在明显的固存效应,这种效应不仅表现在植被恢复的时间上,也表现在土壤垂直分布上。植被恢复区 SOC 和氮含量随恢复时间的延长呈增加趋势,在垂直方向上呈降低趋势。土壤极细沙(0.1~0.05 mm)和粘粉粒含量(<0.05 mm)的时间和空间变异与 SOC 和氮有着相似的趋势。而沙粒含量(0.5~0.1 mm)则随植被恢复时间增加和土层深度的增加呈降低趋势。土壤中极细沙粒(0.1~0.05 mm)和粘粉粒含量(<0.05 mm)分别与 SOC 和氮含量有显著正相关关系($p < 0.01$),而沙粒含量(0.5~0.1 mm)与 SOC 和氮含量呈显著负相关($p < 0.01$)。从植被恢复或者荒漠化逆转角度阐明了干旱沙区土地利用的变化导致的土壤保护性碳组分的增加是土壤碳储量汇功能增加的体现。在研究区域,有机碳和全氮因土壤粘粉粒和极细沙而积累的定量关系可以用线性方程很好地预测,从而为更好地估算荒漠化逆转过程中不同阶段碳汇量提供了依据。而植被恢复中土壤 SOC 和氮与土壤颗粒间的结论加深了荒漠化逆转过程中土地利用方式的改变对气候变化响应的陆地生态系统碳循环过程与机理的理解,明确了我国广泛在干旱沙区实施区域治理对全球大气 CO₂ 汇的贡献。植被恢复过程中,表征土壤肥力特征的 SOC 和氮在时间和空间上的变异对植被演变的影响,以及土壤物理稳定性的增强对土壤抗风蚀能力的贡献。从另一个方面阐述了植被恢复过程中土壤和植被间的这种相互关系及其对生态环境改善的贡献,为探讨干旱沙区荒漠化逆转过程中植物种的选育和合理评价生态环境提供了参考。

关键词 沙区 植被恢复 土壤有机碳 全氮 规律

SOIL ORGANIC CARBON AND NITROGEN DYNAMICS DURING THE RE-VEGETATION PROCESS IN THE ARID DESERT REGION

JIA Xiao-Hong, LI Xin-Rong, and LI Yuan-Shou

Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract Aims It is an important aspect that the soil organic carbon and nitrogen sequestration or release contribute to the soil fertility and atmosphere CO₂. However, soil organic carbon and nitrogen dynamics has been argued during the process of desertification, the soil organic carbon and nitrogen is rarely explain during the re-vegetation process in the arid desert region. Furthermore, there have some debates about the relation between the soil particle content and soil organic carbon and nitrogen. So, the following questions toe will be sought (a) Does soil organic carbon and nitrogen content during the re-vegetation process differs in time and space? (b) How is there the relation between soil particle content and the soil organic carbon and nitrogen content?

Methods The distributions of particle size fractions, organic carbon and total nitrogen content in soils profile of 0–5 cm (include soil crust), 5–10 cm, and 10–20 cm at different years since re-vegetation were analyzed.

Important findings The results showed that soil organic carbon and nitrogen contents increased with time since re-vegetation but decreased with soil depth. Fine sand (0.1–0.05 mm), silt and clay (<0.05 mm) content showed similar temporal and spatial patterns. However, sand (0.5–0.1 mm) content decreased with time since re-vegetation and soil depth. Soil organic carbon and nitrogen contents positively correlated with the contents of fine sand and silt + clay ($p < 0.01$) and negatively correlated with the sand content ($p < 0.01$).

From the point of view of the reversed desertification or re-vegetation process, our results suggest that change of land use can result in carbon sequestration because of the increment of soil protected carbon content in arid desert region. The spatial and temporal changes of soil organic carbon and nitrogen contents as indices for soil fertility may positively feed back to vegetation succession.

Key words desert region, re-vegetation, soil organic carbon, total nitrogen

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和氮素是土壤养分的重要组成部分,也是生态系统中极其重要的生态因子,它们不仅与土壤肥力和植物营养的生物有效性相关,影响植物的生产力,而且与土壤结构关系密切,反映土壤质量。大量的研究表明, SOC在很大程度上影响着土壤的结构和团聚体的形成及其稳定性、土壤的持水性能和植物营养的生物有效性以及土壤的缓冲性能和土壤生物多样性等,缓解和调节与土壤生产力有关的一系列土壤过程,增加土壤的物理稳定性、减缓风蚀,改善区域生态环境(Lal *et al.*, 1990; Trujillo *et al.*, 1997; Herrick & Wander, 1997; Karlen *et al.*, 1999)。土壤质量的变化会引起植被结构、组成的变化,进而影响到植物生产力和凋落物归还量及其分解,导致 SOC 含量的明显分异(Jenkinson *et al.*, 1991)和氮含量差异。反之,植被的演变也会导致土壤性状的改变,影响 SOC 和氮的动态变化。许多研究表明, SOC 含量与粘粒含量呈显著的正相关(Nichols, 1984; Burke *et al.*, 1989; Hontoria, 1999),粘土矿物对有机质的保护作用因粘粒含量的不同也存在一定差异(Jeffrey *et al.*, 1997),不同质地的土壤因持水性能和所含粘粒所占比例不同也影响 SOC 的分布(Jenkinson *et al.*, 1991)。但对于生态环境脆弱的干旱沙区,植被恢复对生态环境的影响是一个动态的变化过程,在这个动态变化过程中表征土壤肥力特征的 SOC、氮和颗粒组成的变化,以及二者间的关系和对生态环境的影响方面的研究还较缺乏。

在降水量小于 200 mm 的沙坡头流沙区,采用麦草方格沙障和栽植固沙植物的方式,改善了土壤成土环境、加强了生物地球化学循环过程,特别是使土壤肥力、持水性能等土壤理化性质发生了改变(肖洪浪等, 1998),促使人工植被的组成发生了变化。SOC、氮作为微生物的能量和细胞构成要素(北京林业大学, 1993),反映着土壤形成过程中有机物质的转化和土壤肥力特性(南京农学院, 1980),了解该区 SOC、氮含量的变化及分布,对进一步探讨土壤形成过程及其与植被格局相互关系具有重要的生态学意义。本文以我国干旱沙漠区流沙治理的成功模式,包兰铁路沙坡头地段无灌溉人工植被防护体系作为

研究对象,对干旱沙区植被恢复下 SOC 和氮分布变化进行了研究,试图阐明流沙固定对于促进土壤氮和碳截存(Carbon sequestration)的效应,分析其与土壤颗粒组成间的关系及其对土壤抵抗风蚀的物理稳定性的贡献,为揭示我国在沙区广泛实施沙漠化治理对全球大气 CO₂ 汇的贡献和生态环境变化及植被恢复重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫县境内的沙坡头地区,地处腾格里沙漠东南缘(37°27' N, 104°57' E),属于草原化荒漠地带,海拔 1 500 m,该区年均气温 9.6 °C,绝对最高气温为 38.1 °C,绝对最低气温为 -25.1 °C,多年平均降水量为 181.6 mm,年蒸发量高达 3 000 mm,为降水量的 15 倍以上(李金贵, 1991)。天然植被盖度约为 1%~2%(王康富, 1991),境内主要分布着高大密集的格状新月形沙丘链,土壤基质为疏松、贫瘠的流沙,沙丘的持水量很低,田间持水量为 3.34%~3.96%,沙层稳定含水量仅 2%~3%,格状沙丘的地下水埋藏很深,达几十米以下,不能为植物利用(李金贵, 1991)。

2 采样地点的选择

采样地点选择在始建于 1956 年的中国科学院沙坡头沙漠试验研究站铁路北的人工植被试验区。为了确保包兰铁路的畅通无阻,自 1956 年起中国科学院和有关单位建立了“以固为主,固阻结合”的防护体系(赵兴梁, 1988)。即在流沙上扎设 1 m×1 m 的麦草方格作为固沙屏障,将沙面稳定后再栽植植物,在沙坡头地段铁路北侧建立了宽为 500 m,长 16 km 的防护体系(图 1)。人工植被建立后经过 40 余年的演变,使该区的生态环境得到了改善,使得原来以流动沙丘为主的沙漠景观演变成了一个复杂的人工-天然荒漠生态系统,降水、降尘等输送的细土物质已对土壤质地产生了影响。群落的结构由单一的灌木半灌木组成演变到一年生草本层逐渐占优势的复杂结构群落,植被覆盖度基本维持在 20%~40%,每年提供的枯枝落叶量 43.6 g·m⁻²(石庆辉和刘家琼, 1995; 石庆辉, 1991-1992)。随植物固沙阶

段的推移,枯枝落叶的增加,大量微生物、藻类、藓类和草本植物等的出现及地表孢子植物的分泌物、残体和大气降尘(每年平均 1.6 mm)以 1~10 mm·a⁻¹ 速度沉积,沙面已由人工植被建立初期的无机结皮逐渐发育成有机结皮(于永江等,2002)。地表生境的变化已对生物防护体系的生态过程产生了影响,并制约着生态环境的动态质量(表 1)(李新荣等,1998;Li *et al.*, 2004)。

3 取样与分析

2004 年 9 月,分别在 1956、1964、1981、1987、1990

(于 1990 年将流动沙丘推平,建立了面积大约为 1 hm² 的人工植被区)和 2000 年(于 2000 年栽植固沙植物种)的植被恢复区,随机选择 4 个采样点,每一样点用直径为 4 cm 土钻在每一部位随机取 20 个样点,分 0~5(包括结皮层)、5~10 和 10~20 cm 均匀混合后,用四分法取出足够样品,带回室内自然风干。并在无人干扰的沙漠腹地,多点混合采集相同层次的流沙地样品。所有土壤样品,去除残留的枯落物后过 2 mm 筛,部分用于测定土壤颗粒组成,部分筛分土样研磨后,全部过 0.25 mm 筛,用于测定 SOC 和土壤全氮含量。用重铬酸钾氧化-外加热法

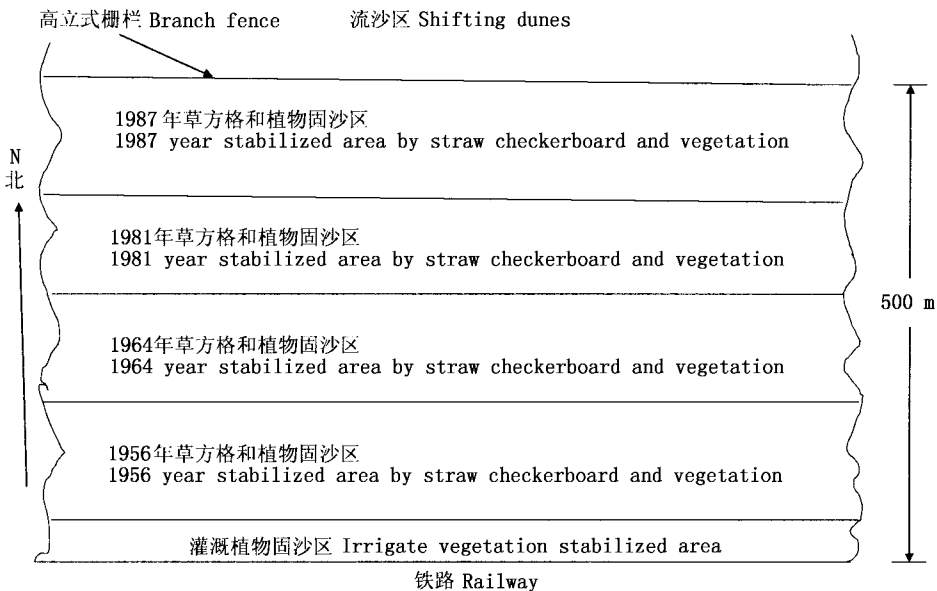


图 1 沙坡头不同年代植被恢复区分布图
Fig.1 Distribution map of different re-vegetation age at Shapotou

表 1 不同年代恢复区生态环境的现状
Table 1 The status of ecological environmental succession in different age of re-vegetation

| 恢复年代 Age of re-vegetation | 植被总盖度 Total vegetation coverage(%) | 优势种 Dominant species | 土壤结皮 Soil crust (cm) | 土壤含水量 Soil moisture (%) | 土壤微生物 Soil microbe amount (10 ³ · g ⁻¹) |
|------------------------------|---|--|---------------------------|------------------------------|---|
| 1956 | 25.19 | 油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>) 雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>) 小画眉草(<i>Eragrostis poaeoides</i>) | 2.1 | 1.162 | 32 253.49 |
| 1964 | 27.67 | 油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>) 雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>) 柠条(<i>Caragana korshinskii</i>) | 1.0 | 1.170 | 63 794.88 |
| 1981 | 36.37 | 沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>) 油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>) | 0.4 | 1.516 | 2 073.10 |
| 1987 | 30.00 | 油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>) 沙木蓼(<i>Atraphaxis bracteata</i>) | 0.3 | 2.027 | |
| 1990 | 40.00 | 油蒿(<i>Artemisia ordosica</i>) 雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>) 小画眉草(<i>Eragrostis poaeoides</i>) | 0.2 | 2.560 | |
| 2000 | | 雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>) 小画眉草(<i>Eragrostis poaeoides</i>) 沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>) | - | 2.720 | |
| 流沙地 Shifting sand | < 1.0 | 沙米(<i>Agriophyllum squarrosum</i>) 花棒(<i>Hedysarum scoparium</i>) | 0 | 3.038 | 15 699.80 |

和凯氏法分析 SOC 和全氮 ,用筛分法和吸管法测定土壤颗粒组成(刘光崧等 ,1996)。 SPSS10.0 单因子方差分析(ANOVA)和最小差异显著法(LSD)用于分析不同年限恢复区土壤各变量之间的关系。

4 结果与分析

4.1 植被恢复过程中土壤碳、氮含量的时间变异

植被恢复区 SOC 和氮含量 ,随植被恢复时间的增加呈逐渐增加的趋势 ,而同一年限植被恢复区随土层深度的增加呈逐渐降低的趋势 ,表现出垂直方向的变异(表 2)。 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层中从流动沙丘到固沙 48 年 SOC 含量分别增加了 2 808.7%、1 607.7%和 908.3% ,土壤全氮含量分别增加了 4 100%、2 500%和 1 400%。 植被恢复 4、14、17、23、40 和 48 年 ,0~5 cm 比其下 20 cm 土层 SOC 分别增加了 3.3%、54.78%、260%、110.34%、201.4%和 176.45% ,全氮含量则增加了 22.22%、81.88%、133.3%、166.67%、150%和 180% ,表明了 SOC 和氮的积累主要存在于地表。这与植被演变过程中 ,随固沙年限的增加草本层和地表隐花植物的发育程度相关(表 1)。 流动沙区因为缺少 SOC 和氮的来源 ,加之外来物质(降尘等)无法截存 ,土壤剖面 SOC 和全氮含量基本无差异。

随植被恢复时间的延长 ,0~5(包括结皮层)、5~10 和 10~20 cm 的 C/N 值均呈逐渐增加的趋势 ,表明植被恢复过程中 SOC 的积累量大于氮 ;而 C/N 在土层垂直方向呈单峰型 ,即先呈增加趋势而后降低 ,进一步说明 SOC 和氮的表层积累及在浅层(0~10 cm)的迁移。不同植被恢复阶段 0~20 cm 土壤 C/N 均呈增加趋势 ,表明干旱沙区随植被恢复时间的延长 ,SOC 和氮的分解速率减慢 ,表现为 SOC 和氮的汇效应 ,促进了土壤碳截存 ,表现出干旱沙区植被恢复对大气 CO₂ 的贡献。

差异显著性分析表明 ,植被恢复过程中 0~10 cm SOC 固存效应存在 3 个恢复年限的阶段 ,0~4、14~23 年和大于 40 年 ,各阶段间差异显著($p < 0.05$) ,其中 23 年以下各阶段内不同恢复年限间差异不显著($p > 0.05$) ,而 40 年以上不同恢复年限间差异显著($p < 0.05$)。 0~10 cm 土壤全氮固存效应变化也有这样的变化趋势 ,与 SOC 不同的是植被恢复 40 年以上时全氮含量差异不显著(表 2)。 说明植被恢复过程中 SOC 和全氮固存效应差异因时间的不同而不同 ,这不仅与 SOC 和氮形成量的积累多少有密切关系 ,而且与枯落物分解速度有关系。 SOC 和全氮作为土壤微生物的能量和细胞构成要素 ,二者含量的多少会影响土壤中微生物的数量 ,间接地影响了枯落物的分解速率 ,也影响着 SOC 和养分的长期积累 ,继而对大气 CO₂ 浓度的改变产生重要的影响。

4.2 植被恢复中土壤颗粒组成变化

虽然在植被恢复过程中 ,土壤剖面不同层颗粒组成中大部分含量仍然主要集中在 0.5~0.1 mm 的细沙中 ,但土壤的颗粒组成分布发生了明显的变化(表 3)。 随恢复年限的延长 ,0~5、5~10 和 10~20 cm 土层中细沙粒(0.5~0.1 mm)含量均有降低趋势 ,而极细沙(0.1~0.05 mm)和粘粉粒(<0.05 mm)含量均有增加趋势。 其中 0~5、5~10 和 10~20 cm 土壤从流动沙丘到固沙 48 年 ,细沙平均含量分别降低了 41.61%、28.78%和 16.73% ,极细沙分别增加了 2 155.60%、1 160.81%和 672.1% ,粘粉粒含量则分别增加了 5 851.35%、5 348.22%和 2 346.71% ,地表颗粒组成的变化显著大于其下土层 ,并且固沙时间越长 ,颗粒组成的增加量和降低量也越大。

同一固沙植被恢复区土壤 ,随深度的增加细沙平均含量均呈增加趋势 ,极细沙和粘粉粒含量则呈降低趋势。 植被恢复 4、14、17、23、40 和 48 年 ,土层

表 2 不同植被恢复区土壤(0~5、5~10 和 10~20 cm)有机碳(SOC)和全氮(TN)的变化
Table 2 Variation of organic carbon(SOC) and total nitrogen(TN) in soils of different year since re-vegetation

| 恢复年限 Year since re-vegetation (a) | 0~5 cm(g·kg ⁻¹) | | | 5~10 cm(g·kg ⁻¹) | | | 10~20 cm(g·kg ⁻¹) | | |
|--|------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|
| | SOC | TN | C/N | SOC | TN | C/N | SOC | TN | C/N |
| 0 | 0.23±0.01 ^a | 0.01±0.01 ^a | 22.92 ^a | 0.26±0 ^a | 0.01±0.01 ^a | 26.03 ^a | 0.24±0 ^a | 0.01±0.01 ^a | 24.21 ^a |
| 4 | 0.93±0.02 ^a | 0.11±0.01 ^b | 8.45 ^b | 0.96±0 ^a | 0.10±0.01 ^b | 9.60 ^b | 0.90±0 ^{abc} | 0.09±0.01 ^b | 10.00 ^b |
| 14 | 1.78±0.01 ^b | 0.20±0.01 ^c | 8.90 ^b | 1.76±0 ^b | 0.13±0.01 ^c | 13.54 ^c | 1.15±0 ^{bc} | 0.11±0.01 ^b | 10.45 ^b |
| 17 | 1.76±0.11 ^b | 0.21±0.03 ^c | 9.37 ^{bc} | 1.77±0.3 ^b | 0.14±0.01 ^c | 14.22 ^c | 1.15±0.25 ^{ab} | 0.11±0.01 ^b | 10.66 ^b |
| 23 | 2.54±0.18 ^b | 0.26±0.04 ^c | 9.50 ^{bc} | 1.79±0.3 ^b | 0.16±0.01 ^c | 11.43 ^c | 1.16±0.23 ^{bc} | 0.12±0.02 ^b | 10.66 ^b |
| 40 | 4.42±0.41 ^c | 0.35±0.04 ^d | 12.37 ^c | 2.38±0.33 ^c | 0.20±0.04 ^d | 13.21 ^c | 1.43±0.2 ^c | 0.14±0.03 ^b | 11.83 ^{bc} |
| 48 | 6.69±0.74 ^d | 0.42±0.06 ^d | 16.01 ^d | 4.44±0.39 ^d | 0.26±0.04 ^d | 18.07 ^d | 2.42±0.28 ^d | 0.15±0.02 ^b | 16.96 ^c |

表中相同列不同字母间表示差异显著 The different letter following mean ± SD with in column are significant difference ($p < 0.05$)

表 3 不同植被恢复区土壤(0~5、5~10 和 10~20 cm)颗粒组成分布(%)
Table 3 Distribution of particle size fractions in soils of different year since re-vegetation

| 恢复年限 Year since re-vegeta- tion (a) | 土壤颗粒组成分布 Distribution of particle size fractions (mm) | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 0.5 ~ 0.1 | 0.1 ~ 0.05 | < 0.05 | 0.5 ~ 0.1 | 0.1 ~ 0.05 | < 0.05 | 0.5 ~ 0.1 | 0.1 ~ 0.05 | < 0.05 |
| | 0 ~ 5 cm | | | 5 ~ 10 cm | | | 10 ~ 20 cm | | |
| 0 | 98.73 ± 0 ^a | 0.90 ± 0 ^a | 0.37 ± 0 ^a | 98.53 ± 0 ^a | 1.20 ± 0 ^a | 0.27 ± 0 ^a | 98.30 ± 0 ^a | 1.40 ± 0 ^a | 0.30 ± 0 ^a |
| 4 | 96.75 ± 0 ^a | 2.30 ± 0 ^a | 0.95 ± 0 ^a | 96.73 ± 0 ^{ab} | 2.30 ± 0 ^a | 0.97 ± 0 ^{ab} | 96.65 ± 0 ^{ab} | 2.49 ± 0 ^{ab} | 0.86 ± 0 ^a |
| 14 | 75.29 ± 0 ^b | 12.40 ± 0 ^b | 12.31 ± 0 ^b | 89.87 ± 0 ^{bc} | 6.07 ± 0 ^b | 4.06 ± 0 ^{bc} | 95.95 ± 0 ^{ab} | 2.86 ± 0 ^{ab} | 1.19 ± 0 ^a |
| 17 | 75.32 ± 3.33 ^b | 14.10 ± 1.8 ^b | 10.58 ± 1.55 ^b | 83.80 ± 1.49 ^{cd} | 9.10 ± 0.78 ^{bc} | 7.10 ± 0 ^{cd} | 92.26 ± 1.12 ^{bc} | 4.59 ± 0.7 ^{bc} | 3.16 ± 0.51 ^b |
| 23 | 69.83 ± 4.88 ^b | 16.34 ± 2.9 ^{bc} | 13.83 ± 2.25 ^b | 81.09 ± 2.53 ^{de} | 11.38 ± 1.57 ^{cd} | 7.53 ± 0.96 ^{cd} | 89.24 ± 0.69 ^c | 6.39 ± 0.39 ^c | 4.37 ± 0.41 ^{bc} |
| 40 | 59.00 ± 4.52 ^c | 20.44 ± 2.28 ^c | 20.57 ± 2.26 ^c | 75.71 ± 3.32 ^{ef} | 13.82 ± 1.61 ^{de} | 10.48 ± 1.75 ^d | 84.81 ± 2.2 ^d | 9.08 ± 1.38 ^d | 6.12 ± 0.97 ^{cd} |
| 48 | 57.65 ± 4.98 ^d | 20.33 ± 1.71 ^c | 22.02 ± 3.28 ^c | 70.17 ± 4.65 ^f | 15.13 ± 2.25 ^e | 14.70 ± 2.4 ^e | 81.85 ± 3.05 ^d | 10.81 ± 1.79 ^d | 7.34 ± 1.3 ^d |

表中相同列不同字母间表示差异显著 The different letter following mean ± SD with in column are significant difference (*p* < 0.05)

表 4 植被恢复过程中土壤物理稳定性指数(St)
Table 4 The physical stability index (St) in the different
year since re-vegetation

| 恢复年限 Year since re- vegetation (a) | 物理稳定性指数 (Physical stability index , St) (%) | | |
|--|---|-----------|------------|
| | 0 ~ 5 cm (包括结皮层 Including soil crust) | 5 ~ 10 cm | 10 ~ 20 cm |
| 0 | 10.72 | 16.60 | 13.79 |
| 4 | 16.88 | 17.06 | 18.04 |
| 14 | 2.49 | 7.47 | 16.66 |
| 17 | 2.87 | 4.30 | 6.27 |
| 23 | 3.17 | 4.10 | 4.58 |
| 40 | 3.70 | 3.92 | 4.03 |
| 48 | 5.24 | 5.21 | 5.68 |

垂直方向 20 cm 处比表层土壤细沙含量分别增加了 - 0.1%、27.44%、22.48%、27.79%、43.74% 和 41.97% ,极细沙分别降低了 - 8.26%、76.9%、67.46%、60.87%、55.58% 和 46.82% ,粘粉粒含量分别降低了 9.47%、90.37%、70.18%、68.41%、70.26% 和 66.66%。流动沙丘因为地表粘粉粒的吹蚀 随土层深度的增加 ,沙粒含量有较弱的降低趋势 极细沙和粘粉粒含量有弱的升高。

差异显著性分析表明 ,固沙区细沙、极细沙和粘粉粒含量也分 3 个恢复年限阶段表现出不同的差异 0~4、14~23 年和大于 40 年。每一阶段间颗粒组成差异均表现出明显差异 (*p* < 0.05) ,阶段内各年份间差异不显著 (*p* > 0.05)。研究区土壤颗粒组成在剖面 and 不同年限间的差异 ,说明干旱沙区植被恢复过程中土壤质地有逐渐变细的趋势 ,这种变化主要在于土壤剖面颗粒组成中极细沙和粘粉粒含量的增加和细沙含量的降低。土壤颗粒组成的差异在 0~5 cm 表现的尤为突出 ,说明干旱沙区对生态环境的改善主要因表层土壤的改变而改变。

4.3 土壤碳、氮与颗粒组成分布的关系

回归分析表明 ,SOC 和氮含量与沙粒含量呈显著的线性负相关 ,与极细沙粒和粘粉粒含量呈显著的正相关(图 2)。显然 ,植被恢复过程中 ,细质土比粗质土固定了更多的碳、氮 ,这与大多数研究表明 SOC 和氮的稳定性主要与土壤中粉粒和粘粒含量有关的结论相一致。植被恢复过程中土壤颗粒组成中极细沙和粘粉粒含量的增加 ,改善了土壤的结构和质地 ,增加了 SOC、氮与颗粒的结合 ,对 SOC 和氮提供了保护。当然 ,这也与地表植被的变化、土壤生物结皮的形成等增加了 SOC 和氮的来源有一定的关系。总之 ,植被恢复过程中土壤表现出的 SOC 和氮固存效应与土壤中粉粒和粘粒含量相关 ,其定量关系可用回归方程表示(图 2)。

植被恢复过程中 ,土壤中沙粒含量每降低 1% ,SOC 和氮含量分别增加 0.117 和 0.008 g·kg⁻¹。极细沙和粘粉粒含量每增加 1% ,土壤中 SOC 和氮含量增加幅度大体一致 ,分别为 0.229 和 0.016 g·kg⁻¹。土壤中颗粒组成含量变化与 SOC 和氮含量间的关系 ,更是说明了植被恢复过程中细粒成份增加和粗粒成份的减少对 SOC 和氮含量固存效应贡献程度 ,极细沙和粘粉粒的增加大于沙粒的减少 ,同时也表明与 <0.05 mm 颗粒结合的保护性 SOC 的稳定性和与沙粒结合非保护性 SOC 的敏感性。

4.4 植被恢复过程中土壤物理稳定指数变化

SOC 含量是反映土壤质量的一个重要指标 ,SOC 影响土壤结构和土壤团聚体形成及其稳定性 (Lal , 2000) ,因而也决定了土壤抵抗侵蚀的物理稳定性。Pieri(1992)提出的土壤物理稳定性指数 (Physical stability index , St)很好地阐释了 SOC 含量与土壤结构保持、土壤发生风蚀风险的关系 ,可以用来评价土壤基质的稳定性。St(%) = SOM% × 100/ (Silt-clay , %)。SOM% 为土壤有机质含量 (Silt-

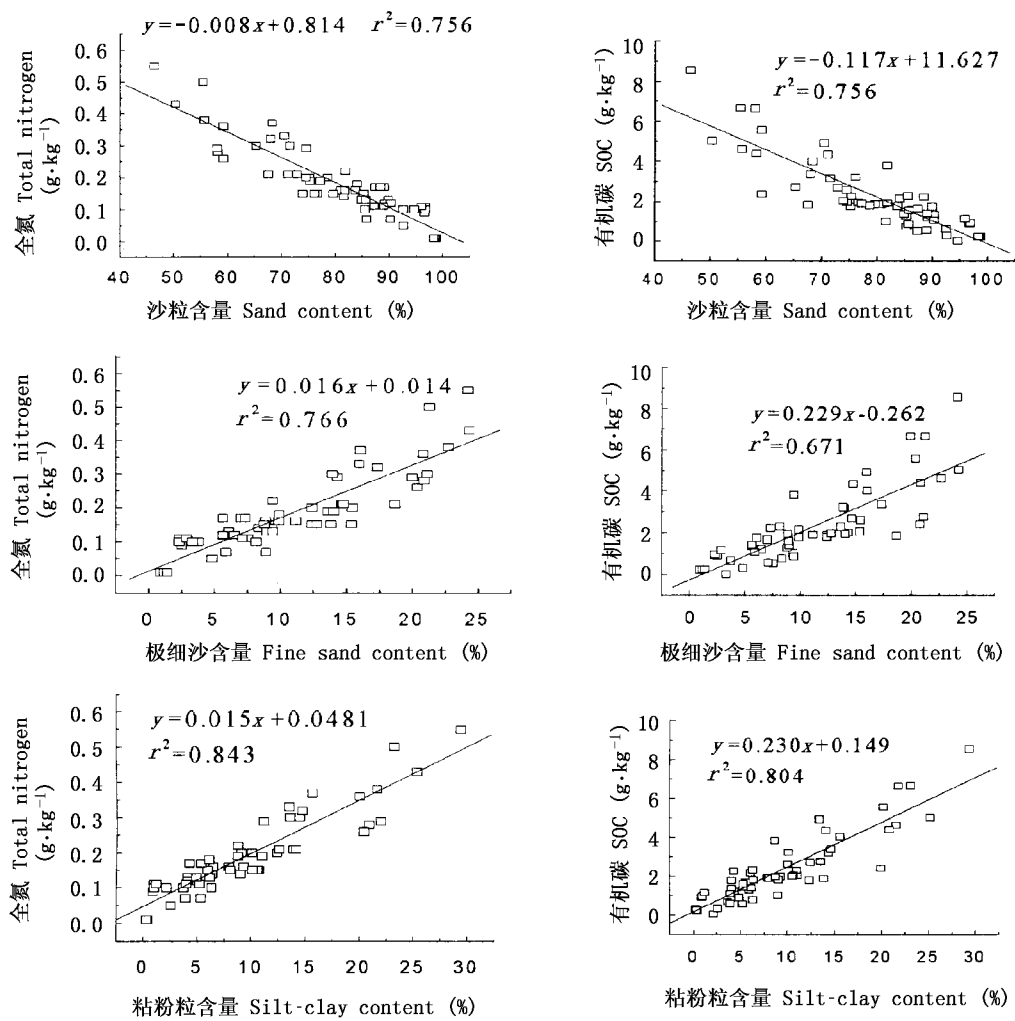


图2 植被恢复过程中土壤有机碳(SOC)和全氮含量与土壤沙粒、极细沙和粘粉粒含量的关系

Fig.2 Relationship between organic carbon(SOC) and N content and sand ,fine sand and silt-clay contents in soils in re-vegetation

clay ,%)为土壤粘粉粒含量。因为土壤垂直方向和时间方向 SOC(即有机质)和粘粉粒含量的差异。研究区土壤物理稳定性指数除流沙在土层垂直方向无规律外,随恢复年限的延长各深度土壤的物理稳定性指数先降低而后上升,并且相同恢复年限随土层深度的增加土壤物理稳定性指数均呈升高趋势,这与 SOC 和粘粉粒含量比例分配相关,恢复初期粘粉粒和 SOC 含量均较低, SOC 的积累大于粘粉粒的积累,故恢复初期土壤的物理稳定性指数较高,而随时间的延长粘粉和 SOC 含量均有增加的趋势,土壤的物理稳定性才真正得到加强。总体来看恢复年限越长垂直方向上物理稳定性指数变异就越小,更是说明了表层土壤对深层土壤的作用。

5 讨论

SOC 和氮的输入主要来源于枯枝落叶及动植物

残体(北京林业大学,1993)。在降水小于 200 mm 的沙坡头流沙区,采用麦草方格沙障和栽植固沙植物的方式,增加了地表粗糙度,降低了地表细沙粒和粘粒的吹蚀,加之大气降尘(每年平均 1.6 mm)以 1~10 mm·a⁻¹速度沉积(于永江等,2002)累计量因地表粗糙度的增加而增加,不仅使土壤中极细沙粒和粘粉粒含量增加,而且为地表孢子植物以及隐花植物的出现创造了有利的条件。相应地,植被恢复区枯枝落叶量的增加、地表孢子植物和隐花植物的分泌物、残体增加了 SOC 和氮的形成量。地表物质的改变以及 SOC 和氮形成量的增加共同导致了与沙粒结合的部分(Gregorich & Ellert, 1993),即对植物残体的积累和根系分布变化非常敏感(Franzluebbers et al., 2000)的非保护性 SOC 和氮含量的增加。非保护性 SOC 和氮形成量的增加是 SOC 和氮表现出截存效应的一个方面;另一方面,与粘粉粒结合的保

护性 SOC 和氮量的增加,也就是稳定性碳和氮的增加是植被恢复过程中 SOC 和氮固存效应的主要部分。保护性和非保护性 SOC 和氮的增加正是干旱沙区植被恢复对减缓大气 CO_2 增加、改善环境条件所做的贡献的体现。植被恢复阶段土壤粘粉粒和极细沙含量每增加 1%,SOC 和氮含量增加分别约为 0.230 和 0.015 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而沙漠化过程中,土壤粘粉粒含量每降低 1%,SOC 和氮含量分别降低 0.169 和 0.022 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (苏永中和赵哈林,2003),从而说明了干旱沙区植被恢复对 SOC 的积累量大于氮,而其逆过程(荒漠化)却是 SOC 的损失大于氮,这与正逆过程中影响微生物数量和活性的因素有关,另外也与土壤 SOC 和氮来源差异有关。从植被恢复或者荒漠化逆转角度说明了干旱沙区土地利用的变化导致的土壤保护性碳组分的增加是土壤碳储量汇功能增加的体现。在本研究的区域,有机碳和全氮因为土壤粘粉粒和极细沙而积累的定量关系可以用线性方程很好地预测,从而为更好地估算荒漠化逆转过程中不同阶段碳汇量提供了依据。

由于地表状况的不同引起植被恢复不同时期,土壤剖面质地和结构以及水分、地温变幅和养分的差异(肖洪浪等,1998;李守中等,2002;王新平等,2002),特别是与微生物的繁殖有密切关系的 SOC 和氮含量的变化,同时也由于随土层深度的增加,土壤颗粒组成基本保持了原始流沙的状况(肖洪浪等,1998),土壤透气性逐渐降低,可供降解的有机物质越来越少,微生物数量下降等因素,加剧了固沙区土壤剖面物理化学反应和矿物分解过程的差异,虽然受地表影响其下土层 SOC 和全氮含量有升高趋势,但幅度不大。不同植被恢复阶段和同一阶段土壤垂直方向上 SOC 和全氮含量的差异,正是植被存在和演变过程中地表有机物质来源量和土壤颗粒组成差异的结果。而表土层土壤物质组成和颗粒组成等的变化,一方面增加了土壤持水性能和保肥能力,加速了沙面结皮由人工植被建立初期的无机结皮逐渐发育成有机结皮(于永江等,2002)使固沙区土壤的养分逐渐积累, SOC 和氮含量发生变化;另一方面,改善了土壤结构,土壤中小孔隙对有机物质较强的物理保护,影响了好氧菌活动或粘粒与有机质的结合等对有机质提供了保护(Lal, 2000),影响了有机物质的“矿化-固化”过程,使固沙区地表 SOC 和全氮含量高于流沙区。这可用有关研究表明细质土比粗质土能固定更多的碳、氮及土壤中 SOC 和氮的稳定性主要与粘粒含量有关的结论(Groffman *et al.*, 1996)

的充分解释。这一结论加深了荒漠化逆转过程中土地利用方式的改变对气候变化响应的陆地生态系统碳循环过程与机理的理解。更加明确了我国广泛在干旱沙区实施区域治理对全球大气 CO_2 汇的贡献。

植被恢复过程中土壤结皮厚度和隐花植物种类的差异,使不同植被恢复区土壤生物结皮对有限降水下渗速度和深度产生差异,导致了降水的有效性和沙层含水量的差异(李守中等,2002;杜岳等,2002),直接导致了不同恢复阶段深根系灌木、浅根性灌木和草本植物种的分配比例和盖度以及组成生物结皮的隐花植物差异(李新荣等,1998;Li *et al.*, 2004;肖洪浪等,2003),影响了植被恢复不同阶段表征土壤肥力的 SOC 和全氮的含量差异,增加了土壤抵抗风蚀的物理稳定性,有利于干旱沙区的生态环境的改善。反过来,植被恢复不同阶段土壤肥力和颗粒组成及其在土壤垂直分布状况的差异也影响了植物对养分、水分的吸收程度和深度以及根系分布深度的变化,导致了沙区植被恢复不同阶段植物种的变化。植被恢复过程中 SOC 和全氮截存效应以及其与颗粒组成变化所表现出的 3 个阶段也正是其演变的结果。植被恢复过程中土壤和植被间的这种相互关系及其对生态环境的改变,为探讨干旱沙区荒漠化逆转过程中植物种的选育和合理评价生态环境提供了参考。

6 结 论

干旱沙区植被恢复过程中, SOC 和全氮存在明显的固存效应,这种效应不仅表现在植被恢复的不同阶段上,也表现在土壤垂直方向上。植被恢复区 SOC 和氮含量及 C/N 随恢复时间的延长呈增加趋势,在土层垂直方向呈降低趋势;而土壤 C/N 随植被恢复年限的延长呈增加趋势,在土层垂直方向呈单峰型变化。SOC 和氮含量随时间的变化说明植被恢复对碳的截存和对大气 CO_2 的贡献。植被恢复过程中土壤极细沙(0.1~0.05 mm)和粘粉粒含量(<0.05 mm)的时间和空间变异与 SOC 和氮有着相似的趋势。而沙粒含量(0.5~0.1 mm)则随植被恢复时间增加和土层深度的增加呈降低趋势。土壤中极细沙粒(0.1~0.05 mm)和粘粉粒含量(<0.05 mm)分别与 SOC 和氮有显著正相关关系($p < 0.01$),而沙粒含量(0.5~0.1 mm)与 SOC 和氮呈显著负相关($p < 0.01$)。从植被恢复或者荒漠化逆转角度说明了干旱沙区土地利用的变化导致的土壤保护性碳组分的增加是土壤碳储量汇功能增加的体现。在本研

究的区域,有机碳和全氮因土壤粘粉粒和极细沙而积累的定量关系可以用线性方程很好地预测,从而为更好地估算荒漠化逆转过程中不同阶段碳汇量提供了依据。而植被恢复中 SOC 和氮与土壤颗粒间的结论加深了荒漠化逆转过程中土地利用方式的改变对气候变化响应的陆地生态系统碳循环过程与机理的理解,更加明确了我国广泛在干旱沙区实施区域治理对全球大气 CO₂ 汇的贡献。植被恢复过程中,表征土壤肥力特征的 SOC 和氮在时间和空间上的变异对植被演变的影响,以及土壤抵抗风蚀物理稳定性的增强,有利于沙区生态环境的改善。从另一个方面表征了植被恢复过程中土壤和植被间的这种相互关系及其对生态环境改善的贡献,为探讨干旱沙区荒漠化逆转过程中植物种的选育和合理评价生态环境提供了参考。而土壤颗粒组成中,保护性和非保护性 SOC、氮是如何分布并影响着植被恢复中碳、氮的固存效应,还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- Burke JC, Yonker CM, Pontoon WJ, Cole CV, Flach K, Schimel DS(1989). Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. Grassland soils. *Soil Science Society of American Journal*, 53, 800 – 805.
- Beijing Forestry University (北京林业大学) (1993). *Pedology (土壤学)*. China Forestry Publishing House, Beijing, 114 – 117. (in Chinese)
- College of Nanjing Agriculture(南京农学院) (1980). *Soil Analysis for Agriculture (土壤农化分析)*. China Agriculture Press, Beijing, 33 – 34. (in Chinese)
- Du Y(杜岳), Yao DL(姚德良), Li XR(李新荣) (2002). A land-atmosphere coupling model and mechanism of the crust layer. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 22, 545 – 551. (in Chinese with English abstract)
- Franzluebbers AJ, Stuedemann JA, Schomberg HH, Wilkinson SR (2000). Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 469 – 478.
- Gregorich EG, Ellert BH (1993). Light fraction and macroorganic matter in mineral soils. In: Carter MR ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton, 397 – 407.
- Groffman PM, Eagan P, Sullivan WM, Lemunyon JL(1996). Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity. *Plant and Soil*, 183, 61 – 67.
- Herrick JE, Wander MM(1997). Relationship between soil organic carbon and soil quality in cropland and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: Lal R ed. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, 405 – 425.
- Hontoria C, Rodriguez-Murillo JC, Saa A (1999). Relationship between soil carbon and site characteristics in Peninsular Spain. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 614 – 621.
- Jeffrey SK, David PT, Dodson RF (1997). Spatial patterns in soil organic carbon pool size in the Northwestern United States. In: Lal R ed. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, 29 – 44.
- Jenkinson DS, Adams DE, Wild A(1991). Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to globe warming. *Nature*, 351, 304 – 306.
- Karlen DL, Rosek MJ, Doran JC (1999). Conservation reserve program effects on soil quality indicators. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(1), 439 – 444.
- Lal R (2000). Carbon sequestration in drylands. *Annual of Arid Zone*, 39(1), 1 – 10.
- Lal R, Logan TJ, Fausey NR (1990). Long-term tillage effects on Mollic orchraqualf in northwestern Ohio soil nutrient profile. *Soil & Tillage Research*, 15, 371 – 382.
- Li JG (李金贵) (1991). Climate characteristics in Shapotou area. In: Shapotou Desert Research and Experiment Station Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences (中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所) ed. *Study on Shifting Sand Control (2) (流沙治理研究二)*. Ningxia People's Publishing House, Yinchuan, 417 – 424. (in Chinese)
- Li SZ(李守忠), Xiao HL(肖洪浪), Song YX(宋耀选), Li JG (李金贵), Liu LC(刘立超) (2002). Interception of soil crust for precipitation in re-vegetated sand dunes in the Tengger Desert. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 22, 612 – 616. (in Chinese with English abstract)
- Li XR(李新荣), Shi QH(石庆辉), Zhang JG(张景光), Liu LC (刘立超) (1998). Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types in Shapotou region. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 18(Suppl. 4), 23 – 29. (in Chinese with English abstract)
- Li XR, Xiao HL, Zhang JG, Wang XP (2004). Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, Northern China. *Restoration Ecology*, 12, 376 – 390.
- Liu GS(刘光崧), Jiang NH (蒋能慧), Zhang LD(张连第), Liu ZL (刘兆礼) (1996). *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles (土壤理化分析与剖面描述)*. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese)
- Nichols JD (1984). Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern Great Plains. *Soil Science Society of American Journal*, 48, 1382 – 1384.
- Pieri CJMG(1992). *Fertility of Soils: a Future for Farming in the West African Savannah*. Springer Verlag, Berlin, 348.
- Shi QH(石庆辉), Liu JQ(刘家琼) (1995). Dynamical variation of natural plants in artificial vegetation area along both sides of railway in Shapotou. In: Liu JQ (刘家琼) ed. *Study of Desert Ecosystem (沙漠生态系统研究)*. Gansu Science and Technology

- gy Publishing House, Lanzhou, 105 – 115. (in Chinese with English abstract)
- Shi QH(石庆辉) (1991 – 1992). Succession of artificial vegetation on Northern side of Bao-Lan railway in the Shapotou area at the southeastern Fringe of the Tennger Desert. *Annual Report-Shapotou Desert Experimental Research Station, Academia Sinica* (中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头试验研究站年报), 89 – 107. (in Chinese with English abstract)
- Su YZ(苏永中), Zhao HL(赵哈林) (2003). Losses of soil organic carbon and nitrogen and their mechanisms in the desertification process of sandy farmlands in Horqin sandy land. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 36, 928 – 934. (in Chinese with English abstract)
- Trujillo W, Amezquita E, Fisher MJ (1997). Soil organic carbon dynamics and land use in the Colobian Savannas. I. Aggregate size distribution. In: Lal R ed. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, 267 – 280.
- Wang KF(王康富) (1991). Studies on sand dunes stabilization in Shapotou area. In: Shapotou Desert Research and Experiment Station Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences (中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所) ed. *Study on Shifting Sand Control* (2) (流沙治理研究二), Ningxia People's Publishing House, Yinchuan, 13 – 26. (in Chinese)
- Wang XP(王新平), Li XR(李新荣), Zhang JG(张景光), Zhou HY(周海燕), Berndtsson R(2002). Variation of soil temperature and thermal diffusivity in vegetation and bare sand dunes in arid desert region. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 22, 344 – 349. (in Chinese with English abstract)
- Xiao HL(肖洪浪), Li XR(李新荣), Duan ZH(段争虎), Li T(李涛), Li SZ(李守中) (2003). Succession of plant soil system in the process of mobile dunes stabilization. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 23, 605 – 611. (in Chinese with English abstract)
- Xiao HL(肖洪浪), Zhang JX(张继贤), Li JG(李金贵) (1998). Succession of soil nutrient in the process of mobile dunes stabilization. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 16(Suppl. 1), 64 – 69. (in Chinese with English abstract)
- Yu YJ(于永江), Lin QG(林庆功), Shi QH(石庆辉), Liu JQ(刘家琼) (2002). Changes of habitat and vegetation in man-made vegetation area of Shapotou section along Baotou-Lanzhou railway. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 22, 433 – 439. (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL(赵兴梁) (1988). A study on the control shifting sand dunes of Shapotou region in the edge of southeastern Tengger Desert. In: Shapotou Desert Research and Experiment Station Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences (中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所) ed. *Study on Shifting Sand Control* (2) (流沙治理研究二). Ningxia People's Publishing House, Yinchuan, 101 – 120. (in Chinese)

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 张丽赫