DOI：10.11766/trxb201812290592

苏永中，刘婷娜. 流动沙地建植人工固沙梭梭林的土壤演变过程[J]. 土壤学报，2020，57（1）：84–91.

SU Yongzhong，LIU Tingna. Soil Evolution Processes Following Establishment of Artificial Sandy-fixing *Haloxylon Ammodendron* Forest[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（1）：84–91.

流动沙地建植人工固沙梭梭林的土壤演变过程*

苏永中，刘婷娜

（中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态-水文研究重点实验室，兰州 730000）

摘　要：梭梭是西北干旱区人工固沙植被建设的主要树种，人工固沙梭梭林建植后植被系统的演变受土壤发育的影响。在河西走廊中段临泽平川绿洲边缘选择 0、3、6、9、16 和 40 a 时间序列的固沙梭梭林地，研究人工固沙植被建植后的土壤发育过程，探讨梭梭植物与土壤反馈作用及其对植被系统演变的影响。结果表明，随着梭梭种植年限的增加，土壤黏粉粒、有机碳（SOC）和全氮（TN）含量逐渐增加，但显著变化发生在种植 9 a 以后的 0～20 cm 表层土壤，而盐分的积累发生在 0～100 cm 整个土层，20～80 cm 土层的盐分积累量高于表层 0～20 cm；盐分组成中，SO_4^{2-}、Ca^{2+} 和 Na^+含量随着梭梭种植年限的增加而增加，在 16 a 和 40 a 梭梭林土壤剖面中有显著积累。梭梭种植 16 a 和 40 a 后，0～10 cm 土层 SOC 含量较未造林沙地分别增加 3.3 倍和 5.7 倍、0～100 cm 土壤剖面盐分含量分别增加 5.4 倍和 6.5 倍，表明梭梭生长发育过程中土壤盐分积累较 SOC 和养分积累更为显著。盐分的积累可能对草本植物的生长发育产生负效应，进而影响人工植被系统的稳定性。在流动沙地建植人工梭梭林 40 a 的时间序列上，土壤从干旱砂质新成土向干旱正常新成土发育；随着盐分的进一步积累和干旱区钙化过程，最终可能演变为钙积正常干旱土，但需更长时间尺度的观测研究。

关键词：固沙梭梭林；种植时间序列；土壤盐分；土壤有机碳；全氮；绿洲边缘

中图分类号：S153　　**文献标志码：**A

Soil Evolution Processes Following Establishment of Artificial Sandy-fixing *Haloxylon Ammodendron* Forest

SU Yongzhong, LIU Tingna

(*Linze Inland River Basin Research Station*, *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Eco-Hydrology in Inland River Basin*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: 【Objective】 *Haloxylon ammodendron* is the main species of shrubs planted to establish a sand-fixing vegetation in the arid region of Northwest China. Evolution of the sand-fixing vegetation system after *Haloxylon ammodendron* is planted, is influenced by soil development. 【Method】 To explore how the soil develops under the *Haloxylon ammodendron* forest in that region, plots of *Haloxylon ammodendron* forests along an age sequence, i.e. of 0-, 3-, 6-, 9-, 16- and 40-year-old, in the edge of the Pingchuan Oasis in Linze County in the middle of the Hexi Corridor were selected in the study and soil samples were collected from the plots for analysis of soil properties. And then discussion was made of plant-soil interactions and their

* 国家重点研发计划项目（2017YFC0504304）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China（No. 2017YFC0504304）

作者简介：苏永中（1966—），甘肃古浪人，研究员，主要从事干旱区土壤学与绿洲农业生态学研究。E-mail：suyzh@lzb.ac.cn

收稿日期：2018–12–29；收到修改稿日期：2019–05–05；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2019–07–22

influences on evolution of the vegetation ecosystem. 【Result】Results show that soil clay and silt, soil organic carbon(SOC)and soil total nitrogen (TN) all increased in content or concentration gradually with the vegetation living on, but the phenomenon became obvious only in the 0～20 cm surface soil, 9 years after the vegetation was established. However, salt accumulation occurred throughout the whole soil profile(0～100cm in depth), especially significant in the 20～80 cm soil layer. SO_4^{2-}, Ca^{2+} and Na^+, the main components of soil salt, increased with the age of the plantations and accumulated significantly in the soil profiles of the 16- and 40-year-old plots. In comparison with non-vegetated land of shifting sand, the *Haloxylon ammodendron* planted plot, 16 and 40 years old, was 3.3 time and 5.7 times, respectively, higher in SOC concentration in the 0～10 cm surface soil layer, and 5.4 and 6.5 times higher in mean salt content in the 0～100cm soil profile. 【Conclusion】 All the findings in this study suggest that soil salt accumulates faster than SOC and soil nutrients in the soils under *Haloxylon ammodendron* in its growing and developing process. Such a salt accumulation rate may affect setting-up and development of herbaceous plants, and in turn influence stability of the artificial vegetation system. Along the 40-year-long age sequence, the soil under *H. Ammodendron* plantation developed from Aridic Psamments to Aridic Orthents and will eventually turn into Calciorthids as affected by the continuous salt accumulation and calcafication process. Hence further observations and studies are needed to verify development of the soil.

Key words: Sand-fixing *Haloxylon ammodendron* plantation; Plantation chronosequence; Soil salt; Soil organic carbon; Total nitrogen; Edge of oasis

梭梭（*Haloxylon ammodendron*），一种藜科梭梭属 C_4 荒漠灌木，分布在新疆、内蒙、甘肃和青海等西北干旱和极端干旱的荒漠区域[1]。由于其对风沙、盐碱、干旱等环境的适应性，育苗、栽植易成活，以及 C_4 植物生长迅速等特性，成为西北干旱区沙漠化土地固沙造林的主要树种[2-3]。随着西北干旱区生态建设的重视，固沙梭梭林种植面积不断扩大，有关梭梭生理、生态特性及其对环境的影响研究也逐渐深入。早期的研究主要集中在梭梭光合生理和水分利用等生理特性，以及梭梭富集养分的“肥岛”特征研究等[4-7]。近年来，梭梭利用水分来源[8]、固沙梭梭林建立后的土壤环境效应研究得到重视并取得一定进展[9-12]，为揭示人工固沙梭梭林退化机制及群落稳定性提供了依据。

植被与土壤之间存在互馈关系[13]。固沙梭梭林建植后对土壤水分的消耗影响梭梭生物量积累、种群结构和分布格局，进而影响植被的演替和植被稳定性[14]。固沙植被建立后，随着梭梭生长发育，灌木对降尘的截获、凋落物在冠层下的积累和根系的周转等[15-17]，导致表层土壤黏粉粒含量增加和结皮层形成，以及有机碳和氮、磷养分随种植年限增加逐渐积累，特别是在灌丛下表现出明显的养分富集[6-7, 9-11]。这种养分的积累表明了植物与土壤的正向反馈，即固沙灌木的生长发育引起的养分积累不仅有利于其自身的生长，也有利于草本植物的发育和生长[13]。但梭梭属稀盐盐生植物（Salt-dilution halophyte），随着梭梭生长发育造成表层土壤盐分的积累。已有研究表明，梭梭冠层下 Na^+、K^+、Cl^- 和 SO_4^{2-} 盐分离子显著高于冠层外裸沙地[10]，梭梭林地表层 0～5cm 土壤电导率值随梭梭生长年限的增加而增加，冠层下高于冠层外[9, 11]。土壤盐分的积累表明了植物与土壤的负反馈，即表层盐分积累形成黏粉粒-盐分和凋落物的混合结皮，影响土壤种子库、以及草本植物的定殖和发育[10]。但有关固沙植被梭梭建植及生长过程中土壤养分、盐分积累的研究多集中于植物个体尺度的影响和表层土壤[6-12]。对固沙梭梭建植后土壤剖面中养分动态、盐分组成变化和土壤发育过程的研究仍有不足。固沙植被建植后土壤系统的演变将影响后续植物的定殖和生长发育、进而影响固沙植被群落演替。本文利用临泽荒漠-绿洲过渡带定位的不同年代种植的梭梭林样地，对梭梭生长过程中土壤剖面养分和盐分特征进行研究，揭示固沙灌木梭梭种植后的土壤发育过程，为揭示梭梭林退化机理及人工固沙植被系统演变提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于河西走廊中段临泽平川荒漠—绿洲

过渡带（39°09′～39°19′N，100°02′～100°21′E，海拔 1 350～1 380 m）。该区域为典型的荒漠气候，年均降雨量 117 mm，多集中在 7—9 月，年蒸发量 2 390 mm，年均气温 7.6℃，无霜期 165 d。年均风速为 3.2 $m \cdot s^{-1}$，大风日数（> 17 $m \cdot s^{-1}$）超过 15 d，风沙活动主要集中在 3—5 月，地下水埋藏深度为 3～8 m。临泽平川绿洲北部为砾质戈壁，土壤为灰棕漠土；东北部为沙丘景观，是巴丹吉林沙漠延伸段，也是风沙入侵张掖绿洲的通道。绿洲边缘沙丘地带分布的天然植被有沙拐枣（*Calligonum mongolicum*）和泡泡刺（*Nitraria tangutorum*）两种灌木，一年生草本植物有沙蓬（*Agriophyllum squarrosum*）、雾冰藜（*Bassia dasyphylla*）、白茎盐生草（*Halogeton arachnoideus*）和碱蓬（*Suaeda glauca*（Bunge）Bunge）等。沙拐枣主要分布于平缓沙坡，泡泡刺以沙堆形态集中分布于丘间低地。天然植被的盖度在 3%～15%，总盖度低于 10%。自 20 世纪 70 年代中期开始，绿洲边缘的沙漠化防治，开始种植以梭梭为主的固沙灌木，2000 年以后，多期的固沙造林为主的生态恢复和建设项目实施，逐渐形成了绿洲边缘至外围约 5 km×10 km 范围不同年代的人工梭梭林景观[2]。

1.2 调查取样

2018 年 7 月中旬，选择种植年限 3 年、6 年、9 年、16 年和 40 年的梭梭林定位样地，未栽植梭梭的流动沙地作为对照样地（0 年）。由于不同年代梭梭林地栽植时均为流动沙地，土壤质地与有机碳等性状在不同时期的测定结果基本一致[2, 11, 18]，近 20 年来荒漠-绿洲过渡带地下水位基本维持不变，表明梭梭栽植时起始的土壤和环境条件一致。每个龄级的梭梭林样地设置 3 个 20 m×20 m 的调查取样样方，在每个样方内随机选择 5 株梭梭个体，对其生长状况株高、冠幅、基茎、枯枝比例、叶片生物量进行调查取样，如表 1。土壤取样方法为：流动沙地对照样地（0 年）在每个样方中随机选取 4 个取样点，不同种植年限梭梭林样地在每个样方中选择距离梭梭主茎 50 cm 的冠层下和冠层外 50 cm 处各 2 个取样点，用土钻按 0～10、10～20、20～40、40～60、60～80 和 80～100 cm 6 个层次取剖面样，4 个取样点所取土样按相应土层混合为一个样，风干后，研磨过 2 mm 筛，取部分样进行土壤粒级、盐分组成的测定；部分样研磨过 0.05 mm 筛用于 SOC、全氮和全磷含量的测定。

表 1 不同种植年限梭梭生长特征

Table 1 Growth characteristics of the *Haloxylon ammodendron* relative to age of the plant

种植年限 Plantation age/a	基径 Stem diameter/cm	株高 Height/cm	冠幅 Canopy area/m^2	枯枝比例 Deadwood proportion
3	1.6	80	0.41	0
6	4.0	127	0.88	0
9	6.3	260	1.06	10
16	11.5	343	4.78	56
40	18.0	350	4.00	62

1.3 土样与植物样品测定

土壤粒级分析采用湿筛加吸管法，土壤有机碳（SOC）采用重铬酸钾外加热法测定[19]，土壤全氮（N）采用德国元素分析仪进行测定（vario Macro Cube elementar，Germany），土壤全磷采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮—钼锑抗比色法测定[19]。土壤盐分采用常规滴定法测定[19]：Na^+、K^+采用火焰光度计法测定；Ca^{2+}、Mg^{2+}采用 EDTA 络合滴定法测定；Cl^-采用 $AgNO_3$ 滴定法测定；SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定；CO_3^{2-}、HCO_3^- 采用双指示剂中和法测定；全盐量为阴、阳离子总和。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 软件进行单因变量双因素（年限和土层）方差分析及显著性检验，并进行种植年限与土壤属性值之间的回归分析。

2 结　果

2.1 土壤剖面粒级组成变化

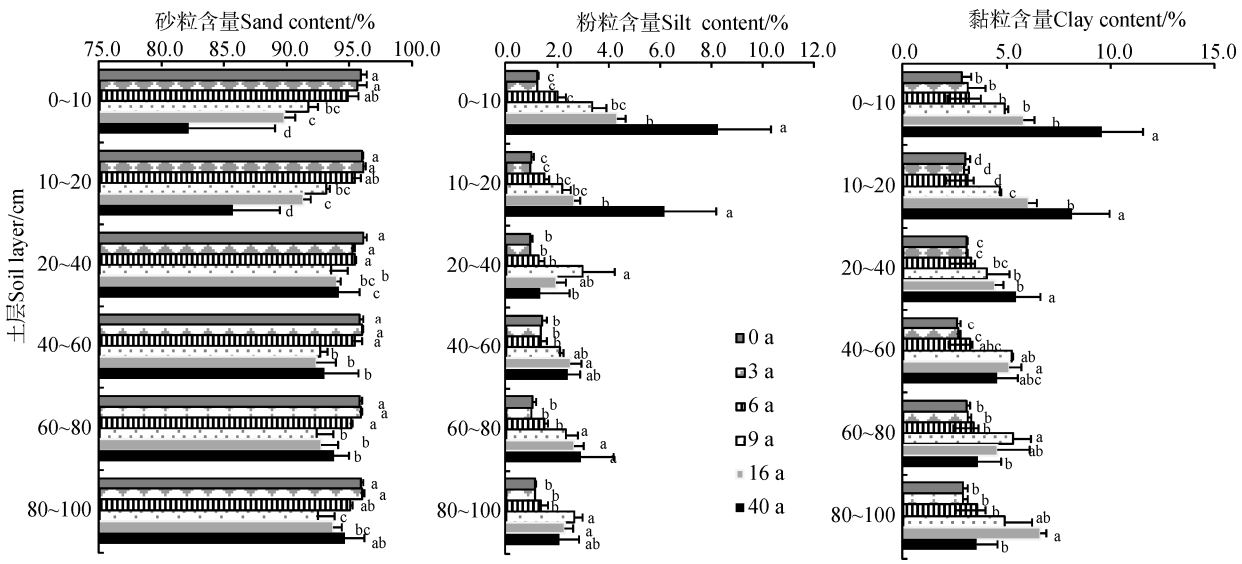
随着梭梭种植年限的增加，表层土壤（0～10 cm 和 10～20 cm）砂粒含量逐渐减少、黏粉粒含量逐渐增加，但其显著差异发生在栽植 9 a 以上的梭梭林地。40 a 梭梭林地 0～10 cm 土层黏、粉粒含量较未种植梭梭相邻流动沙地分别提高 6.8%和 7.0%，10～20 cm 土层分别提高 5.3%和 5.2%。20～40 cm 土层黏粒含量随种植年限的增加而出现较小幅度的增加趋势，但 40 cm 以下土层粒级组成并无变化（图 1）。

2.2 土壤有机碳和氮磷含量的变化

随固沙梭梭林栽植年限的增加，表层 SOC 和全氮含量呈指数增加，3 a、6 a 梭梭林地与无植被沙地相比表层 SOC 有一定程度的增加，但差异不显著，生长 9 a 以后的梭梭林地，SOC 与 0 a、3 a 和 6 a 样地差异达极显著水平，9 a、16 a 和 40 a 梭梭林较无植被沙地表层 SOC 含量分别增加了 2.7 倍、3.3 倍和、5.7 倍。10～20 cm 土层 SOC 与全氮含量随梭梭生长年限的增加，也表现出不同程度的增加，但只有 40 a 梭梭林地 SOC 和全氮含量显著高于其他样地。随土层深度的增加，不同林龄梭梭林地 SOC 和全氮含量差异逐渐减小，40 cm 以下土层已无明显差异（图 2）。相对于 SOC 和全氮含量，土壤剖面中全磷含量变化较小，只有 0～10 cm 和 10～20 cm 土层，40 a 梭梭林地全磷含量显著高于其他样地，16 a 以下各样地之间并无显著差异。随梭梭生长年限的增加，0～10 cm 和 10～20 cm 土层 SOC 的增加幅度高于全氮的增加，C/N 比随林龄增加有显著提高（图 2）。

2.3 土壤剖面盐分的积累

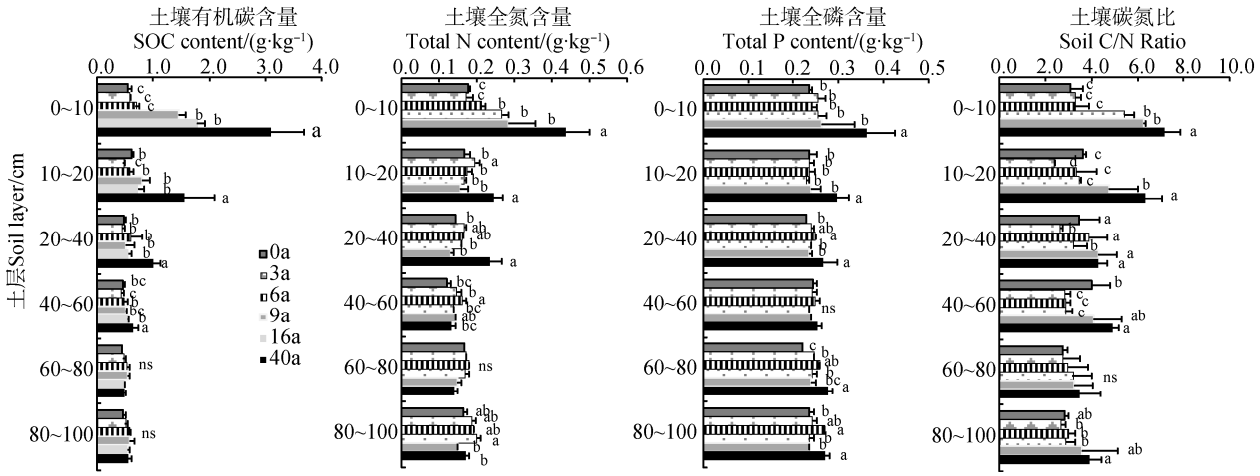
随梭梭生长年限的增加，土壤剖面中盐分逐渐积累。6 a 梭梭林土壤剖面盐分含量已显著高于 0 a 和 3 a 梭梭林，16 a 后盐分含量成倍增加，6 a、9 a、16 a 和 40 a 年梭梭林 0～100 cm 土层平均含盐量分别为未造林流动沙地（0 a，1.53 cmol·kg^{-1}）的 1.28 倍、1.66 倍、5.40 倍和 6.50 倍。不同土层盐分含量变化分析，20～40 cm、40～60 cm 和 60～80 cm 三个土层盐分的积累速率变动在 0.26～0.29 cmol·kg^{-1}·a^{-1}，高于 0～10 cm 和 10～20 cm 表层土壤的累积速率（0.06～0.19 cmol·kg^{-1}·a^{-1}）（表 2）。



注：不同字母表示不同种植年限梭梭林土壤砂粒、粉粒和黏粒含量之间的差异显著（P<0.05）。Note: The different lowercase letters show significant differences (P<0.05) in sand, silt and clay content between different ages of the *Haloxylon ammodendron* plant in the same soil layer.

图 1　不同种植年限梭梭林不同土层土壤砂粒、粉粒和黏粒含量

Fig. 1　Sand, silt and clay content relative to soil layer and age of the *Haloxylon ammodendron* plant



注：不同字母表示不同栽植年限梭梭林土壤有机碳、全氮、全磷和碳氮比之间的差异显著性（$P<0.05$）。Note：The different lowercase letters show significant differences（$P<0.05$）in SOC，total N and P content，and C/N ratio between different ages of the *Haloxylon ammodendron* plant in the same soil layer.

图 2 不同种植年限梭梭林不同土层土壤有机碳、全氮和全磷含量及碳氮比

Fig. 2 SOC，total N and total P content，and C/N ratio relative to soil layer and *Haloxylon ammodendron* planting age

表 2 土壤盐分积累与梭梭种植年限的关系

Table 2 Salt accumulation（Salt）in the soil under *Haloxylon ammodendron* relative to age of the plant（a）

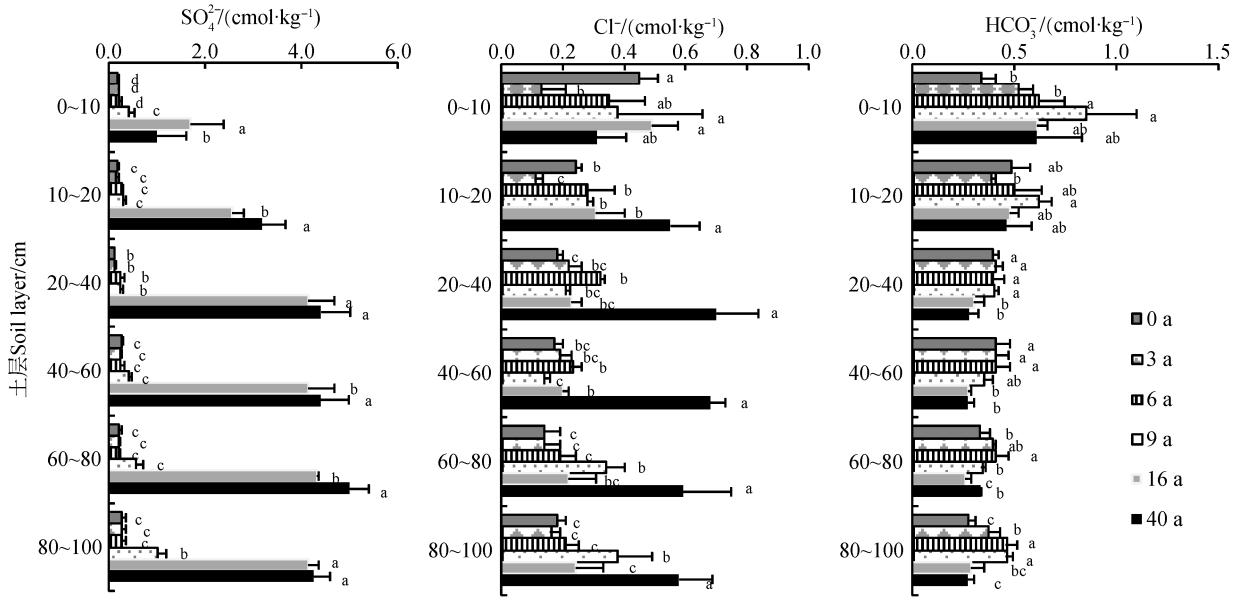
土层 Soil layer /cm	回归关系 Regression relation	R^2
0～10	Salt=2.458 8+0.061 7a	0.420
10～20	Salt=1.422 4+0.194 1a	0.843
20～40	Salt=1.248 7+0.257 4a	0.781
40～60	Salt=1.046 7+0.276 1a	0.865
60～80	Salt=1.058 4+0.285 0a	0.842
80～100	Salt=1.675 9+0.228 8a	0.819
0～100	Salt=1.394 1+0.235 2a	0.827

土壤盐分组成分析，阴离子以 SO_4^{2-} 为主，随梭梭种植年限的增加，土壤剖面中 SO_4^{2-} 含量的变化与全盐量的变化基本相同，在梭梭种植 0～9 a 时间缓慢增加，0～100 cm 土层 SO_4^{2-} 平均含量由 0 a 的 0.21 cmol·kg^{-1} 增加至 9 a 梭梭林地的 0.51 cmol·kg^{-1}。16 a 后 SO_4^{2-} 含量显著提高。16 a 和 40 a 年梭梭林地 0～100 cm 土层 SO_4^{2-} 平均含量分别为流动沙地的 16.6 倍和 17.6 倍（图 3）。Cl^-含量相对较低，且不同土层之间变化相对较小、差异不显著，不同种植年限梭梭林地，0～100 cm 土层 Cl^-平均含量变动在 0.16 cmol·kg^{-1}（3 a）～0.57 cmol·kg^{-1}（40 a）之间，除 0～10 cm 表层土壤外，土壤剖面 Cl^-含量的变化随梭梭种植年限的增加而增加，40 a 梭梭林地 Cl^-含量显著高于其他林地。HCO_3^- 含量不同土层之间和不同龄级梭梭林地之间变动较小，但差异显著，表层 0～10 cm 土壤 HCO_3^- 含量显著高于其他土层，种植 9 a 的梭梭林地高于其他林地（图 3）。

随着梭梭生长年限的增加，土壤盐分中阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+的积累为主，Mg^{2+}和 K^+含量极低。Ca^{2+} 在土壤剖面的变化与全盐和 SO_4^{2-} 的变化相似，0～100cm 土层 Ca^{2+}平均含量由 0 a 的 0.28 cmol·kg^{-1} 增加至 40 a 的 1.99 cmol·kg^{-1}；20 cm 以下土层 Ca^{2+} 随梭梭生长年限的积累量显著高于 0～10 cm 和 10～20 cm 表层土壤。Na^+含量随梭梭生长年限的增加不同土层均有明显的积累，在生长 9～40 a 的时间段积累速率明显快于 0～9 a 的积累速率。相同种植年限梭梭林地 Na^+含量在土壤剖面中的分布相对均一，土层之间的差异显著性低于 Ca^{2+}，在 20～40 cm、40～60 cm 和 60～80 cm 三个土层随梭梭生长的积累量高于表层 0～10 cm 和深层 80～100 cm 的积累量。土壤中 Mg^{2+}含量较低，梭梭生长对其影响程度相对较小，只是在 10～20 cm、40～60 cm 和 60～80 cm 土层 16 a 和 40 a 梭梭林地 Mg^{2+} 含量显著高于其他样地。K^+含量较 Mg^{2+}含量更低，在 0.01～0.18 cmol·kg^{-1} 之间变动，表层 0～10 cm 和 10～20 cm 高于 20 cm 以下土层含量，16 a 和 40 a

梭梭林地 K^+含量有显著积累，但其绝对含量仍很低（图 4）。

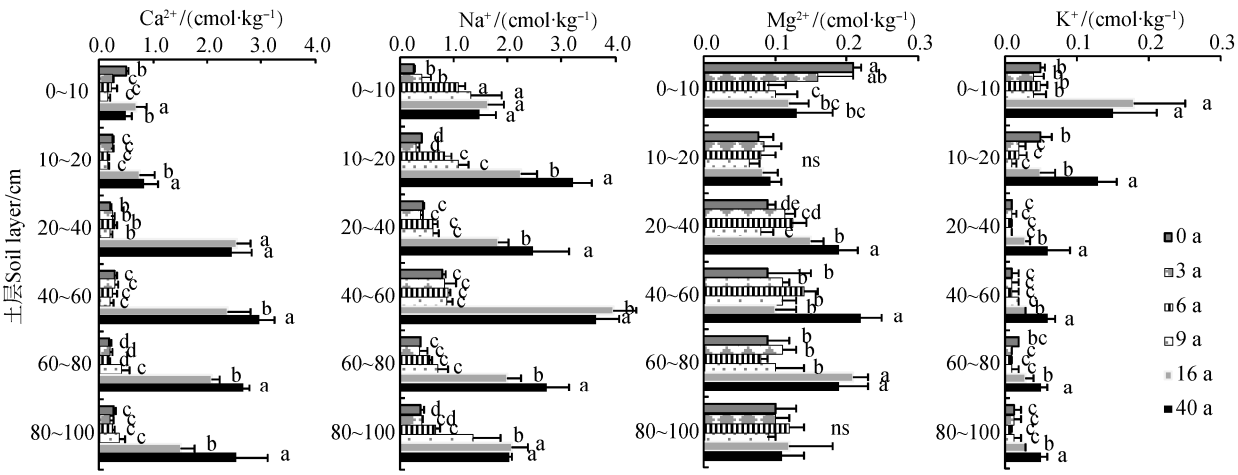
土壤中 SO_4^{2-}、Ca^{2+}和 Na^+含量的变化决定了土壤剖面中盐分的分布与变化（图 3～图 4）。



注：不同字母表示不同种植年限梭梭林土壤 SO_4^{2-}、Cl^- 和 HCO_3^- 含量之间的差异显著性（$P<0.05$）。Note: The different lowercase letters show significant differences（$P<0.05$）in SO_4^{2-}, Cl^- and HCO_3^- content between different ages of the *Haloxylon ammodendron* plant.

图 3　不同种植年限梭梭林不同土层土壤阴离子含量

Fig. 3　Soil anion content relative to soil layer and age of the *Haloxylon ammodendron* plant



注：不同字母表示不同种植年限梭梭林土壤 Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+} 和 K^+ 含量之间的差异显著性（$P<0.05$）。Note: The different lowercase letters show significant differences（$P<0.05$）in Ca^{2+}, Na^+, Mg^{2+} and K^+ content between different ages of the *Haloxylon ammodendron* plant.

图 4　不同种植年限梭梭林不同土层土壤阳离子含量

Fig. 4　Soil cation content relative to soil layer and age of the *Haloxylon ammodendron* plant

3　讨　论

固沙植被建植后风速降低，植被对降尘的截获使表层土壤细粒物质不断积累，导致表层土壤砂粒含量逐渐减少、黏粉粒逐渐增加，土壤质地发生显著变化，这已被中国北方不同固沙区域的研究所证实[15-17, 20]。本研究表明梭梭种植 16 a 后，亚表层（10～20 cm）黏粉粒含量也有显著增加，一方面是

由于随着植被生长，凋落物在冠层下的积累和表层细粒物质的增加、以及风蚀作用，冠层下由凋落物及细粒物质胶结形成的土层逐渐增厚，另一方面，土壤动物的扰动使表层和亚表层土壤混合，导致亚表层的粒级组成也发生变化。土壤黏粉粒含量的增加为土壤结皮形成提供了胶结物质，也是 SOC 含量和 N、P 养分增加的一个主要方面[16-17, 20]。研究结果表明，表层土壤 SOC 与全氮含量随梭梭生长年限增加而逐渐积累，9 a 后差异显著，而全磷含量只有 40 a 梭梭林有显著提高，这与前期对表层土壤的研究结果基本一致[11]。在表层以下 10～20 cm 和 20～40 cm 土层，SOC 和全氮含量只在植被建植 40 a 后有显著变化，SOC 的变化较全氮的变化更为明显，固沙植被建植对土壤 P 的影响更为微弱。SOC 与养分含量在土壤剖面中的分布变化表明了固沙植被建植后，成土的生物作用有所增强，建植 40 a 后的梭梭林，在表层已形成 2～5 cm 厚度、由分解和半分解的凋落物、黏粉粒和盐分胶结形成的多孔结皮层特征，有一定程度的腐殖质积累和弱发育的腐殖质层的分化，表明土壤已从干旱砂质新成土向干旱正常新成土发育。受限于有限的降雨量（110 mm），流沙固定后未能形成草本植物层，生物土壤结皮也未能发育，与沙坡头地区流动沙地人工植被建植后的土壤演变相比，土壤发育进程明显缓慢[16]。

梭梭是稀盐盐生植物，在生长发育过程中吸收大量的盐分[21]，盐分积累能够降低组织渗透势和水势、增强水分吸收动力，通过积盐增强抗旱能力[22]。但吸收的盐分通过凋落物进入土壤，引起土壤盐分的积累。已有研究表明，随着梭梭生长年限的增加，表层 0～5 cm 和 5～20 cm 土层土壤电导率逐渐增加，39 a 梭梭林 0～5 cm 和 5～20 cm 土层电导率分别较无植被对照区平均增加了 12.6 倍和 10.0 倍[11]。土壤表层盐分离子 SO_4^{2-}、Cl^-、Na^+ 和 K^+ 含量冠层下显著高于冠层外[10]。本研究结果表明，随着梭梭种植年限的增加，土壤盐分不仅在表层土壤积累，在 0～100 cm 各土层中均有明显积累，而且 16 a 和 40 a 梭梭林地平均盐分含量 40～100 cm 层（4.42～4.60 $cmol \cdot kg^{-1}$）明显高于 0～10 cm 和 10～20 cm 层土壤（3.22～3.82 $cmol \cdot kg^{-1}$）（图 3～图 4），表明植物根系对水分和盐分的吸收导致盐分离子向根区迁移，随着梭梭对深层土壤水分的吸收利用，深层盐分不断向根系分布层积累。20～120 cm 层是梭梭根系的主要分布区[9]，梭梭根际土壤盐分含量明显高于非根际土壤，表明植物根系对盐分的吸收积聚效应[23]。从土壤剖面中盐分离子 Ca^{2+}的分布及变化分析，16 a 以上的梭梭林在 20 cm 土层以下已有钙积现象，40 a 梭梭林土壤剖面中已有碳酸钙的白色沉积，但仍未形成明显的钙积层。随着梭梭生长年限的增加，土壤最终向钙积正常干旱土演变；土壤盐分含量的进一步增加，也可能使土壤向盐化钙积正常干旱土演变，需要更长时间序列的观测研究。

在流动沙地建植人工固沙梭梭 40 a 的时间序列上，土壤黏粉粒、SOC 和全 N 含量的显著变化主要发生在表层 0～20 cm 土壤，而盐分的积累发生在 0～100 cm 土层，盐分的积累效应明显大于养分的积累。这种梭梭引起的土壤变化可能对梭梭的自身生长产生正反馈作用，因为梭梭是稀盐盐生植物，其生长需要吸收养分，也需要大量的盐分；但对其他植物种如草本植物的生长发育产生负反馈作用，如表层黏粉粒含量增加、结皮层形成不利于草本植物土壤种子库的积累，盐分的积累对一些植物的发育产生抑制[10]。梭梭种植 10 a 后，处于不断的自疏和衰退生长过程，沙面稳定后草本植物数量和盖度有所增加，出现物种主要是耐盐的短命植物种如白茎盐生草和雾冰藜等[11]，40 a 后仍未能形成灌木与草本植物结合的植被生态系统，人工植被的稳定性和植被系统的长期演变需要更长时间尺度的观测。

4 结 论

西北干旱区绿洲外围流动沙地栽植固沙灌木梭梭后，在 0～40 年的栽植时间序列上，0～20 cm 表层土壤黏粉粒含量、有机碳及全氮含量随栽植年限逐渐积累；以 SO_4^{2-}、Ca^{2+} 和 Na^+为主的盐分离子在 0～100 cm 土层随梭梭生长发育而不断积累；梭梭生长 40 年后，土壤由干旱砂质新成土发育为干旱正常新成土；随着土壤盐分的进一步积累，对人工固沙植被的稳定及土壤发育的影响需更长时间尺度的观测研究。

参考文献（References）

[1] Liu J L, Wang Y G, Yang X H, et al. Genetic variation in seed and seedling traits of six *Haloxylon ammodendron* shrub provenances in desert areas of China. Agroforestry

Systems，2011，81：135—146.

[2] Su Y Z，Zhao W Z，Su P X，et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis–desert ecotone in an arid region：A case study in Hexi Corridor，Northwest China. Ecological Engineering，2007，29：117—124.

[3] Yang W B，Feng W，Jia Z Q，et al. Soil water threshold for the growth of *Haloxylon ammodendron* in the Ulan Buh desert in arid northwest China. South African Journal of Botany，2014，92：53—58.

[4] Su P X，Cheng G D，Yan Q D，et al. Photosynthetic regulation of C_4 desert plant *Haloxylon ammodendron* under drought stress. Plant Growth Regulation，2007，51：139—147.

[5] Li J，Zhao C，Zhu H，et al. Effects of plant species on shrub of fertile island at an oasis—desert ecotone in the South Junggar Basin，China. Journal of Arid Environments，2007，71：350—361.

[6] Liu Y H，Yang Y L，Sheng J D，et al. Fertile island characteristics of soil nutrients in *Haloxylon ammodendron* land in North Xinjiang. Acta Pedologica Sinica，2010，47（3）：546—554.[刘耘华，杨玉玲，盛建东，等.北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究. 土壤学报，2010，47（3）：546—554.]

[7] Li C J，Li Y，Ma J. Spatial heterogeneity of soil chemical properties at fine scale induced by *Haloxylon ammodendron*（Chenopodiaceae）plants in a sandy desert. Ecological Research，2011，26：385—394.

[8] Zhu Y J，Jia Z Q. Soil water utilization characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation with different age during summer. Acta Ecologica Sinica，2011，31：341—346.

[9] Wang G H，Zhao W Z，Liu H，et al. Changes in soil and vegetation with stabilization of dunes in a desert-oasis ecotone. Ecological Research，2015，30（4）：639—650.

[10] Zhang G F，Zhao L W，Yang Q Y，et al. Effects of desert shrubs on fine-scale spatial patterns of understory vegetation in dry-land. Plant Ecology，2016，217：1141—1155.

[11] Zhang K，Su Y Z，Wang T，et al. Soil properties and herbaceous characteristics in an age sequence of *Haloxylon ammodendron* plantations in an oasis-desert ecotone of northwestern China. Journal of Arid Land，2016，8（6）：960—972.

[12] Cao Y F，Li Y，Li C H，et al. Relationship between presence of the desert shrub *Haloxylon ammodendron* and microbial communities in two soils with contrasting textures. Applied Soil Ecology，2016，103：93—100.

[13] van der Putten W H，Bardgett R D，Bever J D，et al. Plant-soil feedbacks：The past，the present and future challenges. Journal of Ecology，2013，101：265—276.

[14] Li F，Zhao W Z. Hydrologic thresholds and changes in NPP of artificial sand-fixing vegetation in a desert-oasis ecotone in Northwest China. Journal of Arid Environments，2017，146：44—52.

[15] Xiao H L，Li X R，Duan Z H，et al. Succession of plant-soil system in the process of mobile dunes stabilization. Journal of Desert Research，2003，23（6）：605—611. [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.]

[16] Su Y Z，Zhao H L. Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy Land，North China. Ecological Engineering，2003，20：223—235.

[17] Su Y Z，Wang X F，Yang R，et al. Effects of sandy desertified land rehabilitation on soil carbon sequestration and aggregation in an arid region in China. Journal of Environment Management，2010，91：2109—2116.

[18] Chen L H，Li F X，Di X M，et al. Aeolian sandy soils in China. Beijing：Science Press，1998.[陈隆亨，李福兴，邸醒民，等. 中国风砂土. 北京：科学出版社，1998.]

[19] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis. Beijing：China Agriculture Press，2000. [鲍士旦.土壤农化分析. 北京：中国农业出版社，2000.]

[20] Li C J，Lei J Q，Gao P，et al. Research progress of soil forming process of aeolian sandy soil under the effect of artificial shelter-belt. Acta Pedologica Sinica，2012，49（6）：1227—1234. [李从娟，雷加强，高培，等. 人工防护林作用下风沙土成土过程的研究进展. 土壤学报，2012，49（6）：1227—1234.]

[21] Xi J B，Zhang F S，Chen Y，et al. A preliminary study on salt contents of soil in root-canopy area of halophytes. Chiese Journal of Applied Ecology，2004，15（1）：53—58. [郗金标，张福锁，陈阳，等. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究. 应用生态学报. 2004，15（1）：53—58.]

[22] Bai X F，Zhu J J，Wang Z L，et al. Relationship between the salt accumulation and the drought resistance in several woody plants in arid zone. Scientia Silvae Sinicae，2012，48（7）：45—49. [柏新富，朱建军，王仲礼，等. 干旱区木本植物盐分积累与其耐旱性的关系. 林业科学，2012，48（7）：45—49.]

[23] Li C J，Ma J，Li Y. Salt content in the rhizosphere of five psammophytes. Acta Ecologica Sinica，2009，29（9）：4649—4655. [李从娟，马健，李彦. 五种沙生植物根际土壤的盐分状况. 生态学报，2009，29（9）：4649—4655.]

（责任编辑：檀满枝）