DOI：10.11766/trxb201806260176

河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应*

王彦武[1]　罗　玲[2]　张　峰[1†]　陈天林[3]

（1 甘肃省水土保持科学研究所，兰州　730020）

（2 河南理工大学资源环境学院，河南焦作　454000）

（3 甘肃省水利厅水土保持局，兰州　730000）

摘　要　研究不同龄阶梭梭林对土壤的保护效应和复育效应的变化特征，探讨各因子之间的相互关系和梭梭林保育土壤的内在机制，可为治理河西绿洲荒漠过渡带梭梭林的土壤质量提供理论基础。在民勤绿洲荒漠过渡带采用典型抽样和空间代替时间的方法，以不同龄阶的梭梭林（20a、30a、40a）和裸沙地为研究对象，定期监测其防风固沙作用和土壤机械组成、化学性质、微生物数量及土壤酶活性变化特征，并分析了各因子的变化规律和相关关系。结果表明：梭梭林保护土壤的效应取决于梭梭林的生长情况及树龄，距离梭梭植株越近，风速逐渐减小，且背风面的减小程度大于迎风面；梭梭林中下部对风速的阻碍作用大，风速降低幅度为顶端处的1.05倍～2.04倍；随着梭梭林龄的增长，风速降低幅度的均值由12.66%增大至20.41%。各龄阶梭梭林土壤粉粒和黏粒所占比例远远小于粗砂粒和细砂粒，随土层深度增加，粉粒和黏粒含量略有减小，但均显著大于裸沙地；随着树龄增加，土壤黏粒和粉粒含量增大，粗砂粒含量减小，分别在30年时出现峰值和谷值。各龄阶梭梭林土壤的养分含量、微生物数量和酶活性各指标均表现为30年生梭梭林>40年生梭梭林>20年生梭梭林，且均为裸沙地的1.02倍以上。梭梭林土壤保育效应因子、土壤机械组成、土壤养分、微生物数量和酶活性之间均有较好的相关性，梭梭林的风速降低程度与土壤的机械组成呈极显著相关，相关系数达到了0.87以上。从梭梭林保护土壤和改良土壤效应两方面综合考虑，30年生梭梭林更适合当地生境条件，其土壤保育效果最好。

关键词　绿洲荒漠过渡带；梭梭林；土壤保育；复育效应；保护效应

中图分类号　S157.5　　**文献标识码**　A

植被的土壤保育效应包含两个内涵：一是植被对土壤的保护效应，即植被的阻挡拦沙和防风固沙作用；二是植被对土壤的复育效应，即植被对退化土壤质量的恢复和改良作用。土壤机械组成、有机质、氮素、磷素及生物学特性是评价土壤质量的重要指标[1-2]，对改良土壤的松紧程度、改善土壤水肥状况和防治土壤沙化具有重要作用[3]，而植被的防风固沙效应是改善这些土壤复育效应指标的前提保障。植被通过树冠等的阻挡作用降低风速，减少风的动能，防止对土壤的风力侵蚀[4]，进而拦截近地表风沙流中携带的物质，使其在冠层下沉积[5]，最终达到阻风拦沙的目的[6-7]。土壤和植

* 甘肃省青年科技基金项目（1506RJYA177）和甘肃省自然科学基金项目（1308RJZA237）资助 Supported by the Natural Science Foundation for Young Scientists of Gansu Province, China（No. 1506RJYA177）and the Natural Science Foundation of Gansu province, China（No. 1308RJZA237）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhangfeng_lz@163.com

作者简介：王彦武（1982—），男，甘肃会宁人，博士，高级工程师，主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail：wang_yanwu@163.com

收稿日期：2018-06-26；收到修改稿日期：2018-09-04；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2018-10-12

被不同特征参数之间相关性显著，在退化生态系统的植被恢复过程中，植物与土壤之间的相互作用方式主要是植被对土壤的保护改良作用和改良的土壤对植被的促进作用[8]。因此，研究植被对土壤的保护效应和复育效应成为防治土地沙化的关键。

梭梭（*Haloxylon ammodendron*）是河西绿洲荒漠过渡带优良的防风固沙造林树种，具有抗旱、抗寒，喜瘠薄、喜干燥，对风蚀沙埋的生态适应性强等特点[9]。近年来，由于河西绿洲荒漠过渡带地下水位持续下降，大面积的梭梭林发生退化，退化面积达270 km^2[10]，给荒漠化的防治工作带来极大地挑战。因此，要巩固治沙造林成果，有效制止梭梭林边治理、边退化、边破坏现象的发生，需要对梭梭林保护土壤和改良土壤的效应进行深入的分析。目前，学者们对梭梭的研究绝大多数是从梭梭林地水分平衡[10-11]、退化及恢复更新[12]、群落结构[13]、土壤理化特性[14]、防风固沙功能[15]、病虫鼠害[16]等角度进行分析，而对梭梭林土壤保护与土壤复育间关系的研究较少，尤其是有关河西绿洲荒漠过渡带梭梭林保护土壤效应和改良土壤效应各因子间相关关系方面的研究，目前还未见报道。

梭梭林在河西绿洲荒漠过渡带防治荒漠化的过程中起着独特的作用[17]，它不但可以防风固沙，而且对土壤养分及土壤生物学性质有重要影响。然而，随着梭梭林龄的增加，其防风固沙效果和土壤质量状况如何变化？梭梭林保护土壤效应因子对改良土壤质量是否有显著影响？土壤保护与土壤改良效应因子间的相关关系如何？上述问题的研究将对进一步分析河西绿洲荒漠过渡带梭梭林的土壤质量和健康状况奠定基础。因此，本研究通过野外调查和室内分析，对河西绿洲荒漠过渡带不同龄阶梭梭林保护土壤的效应和改良土壤的效应进行了研究，探讨各因子之间的相互关系和梭梭林保育土壤的内在机制，为保护、恢复和治理河西绿洲荒漠过渡带生态环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于石羊河流域下游甘肃省河西走廊东北部的民勤治沙试验站区（38°35′N，102°58′E），该区域为典型的干旱荒漠气候，年均降雨量113 mm，且多集中在7、8、9三个月，年均蒸发量2 644 mm，年平均气温7.7℃，无霜期约151 d。西北风向为主，多年平均风速为2.7 $m\cdot s^{-1}$，年最大风速为23 $m\cdot s^{-1}$，大风日数（瞬时风速≥17 $m\cdot s^{-1}$）42 d。该区土壤以灰棕漠土、风沙土和草甸土为主。20世纪60年代以来，在绿洲边缘营造的防风固沙树种梭梭，现已成为该区域主要的人工—天然植被群落。该区域其他的防风固沙植被有花棒（*Hedysarum scoparium*）、白刺（*Nitraria tangutorum* Bobr.）、多枝柽柳（*Tamarix ramosissima* Ledeb.）、膜果麻黄（*Ephedra przewalskii Stapf*）、沙拐枣（*Calligonum mongolicum* Turcz.）、红砂（*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)、沙蒿（*Artemisia desertorum* Spreng.）、沙棘（*Hippophae rhamnoides* Linn.）、柠条（*Caragana Korshinskii* Kom.）、沙打旺（*Astragalus adsurgens* Pall.）、黄花矶松（*Limonium aureum* (Linn.) Hill.）、狗尾草（*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.）等。

1.2 标准样地设置

采用典型抽样和空间代替时间的方法，在研究区选择不同龄阶的梭梭林（20a、30a、40a）和裸沙地为研究对象，在每个龄阶的梭梭林中分别设置4个30 m×30 m的研究样地，样地中梭梭植株行距约为3 m×5 m，两行间的梭梭呈“品”字型排列，风季梭梭树冠的疏透度为0.42。每个样地的立地条件类型基本一致，人为干扰较少。样地基本情况见表1。

1.3 梭梭林防风固沙效应的野外测定

2016年3月至5月，在样地内选择标准梭梭木各3株，确定主风方向后，在每株标准木的迎风面和背风面各布置4个观测点，观测点距标准木距离分别为0.5 m、1 m、2 m和3 m，观测点周围无其他植被影响。每场起沙风时，在每个观测点用HOBO小型移动气象站同时测定高度为20 cm、50 cm、100 cm、200 cm处的风速值，每10秒记录1次，每组20次，同一观测点连续观测3组，取平均值，以裸沙地为对照，最终分析不同高度和距离处梭梭林的防风效能。

1.4 梭梭林改良土壤效应的野外测定

2016年3月、5月、9月、11月，在样地内运用多点混合取样法采集土样。取样时，在每块样地沿“S”型线路分别选设5个2 m×2 m的样

表1　梭梭样地基本情况表

Table 1　Basic information of the *Haloxylon ammodendron* stands

样地编号 Sample number	林地类型 Forest types	龄阶 Age class /age	株高 Height /m	密度 Density /（Plant·hm^{-2}）	地径 Ground diameter /cm	冠幅 Crown width /m	盖度 Coverage /%	立地条件 Site condition
CK	裸沙地	—	—	—	—	—	0	流动沙地
Ⅰ	40年生	44.0 ± 4.24	2.25 ± 0.35	1005.0 ± 63.60	11.0 ± 1.41	1.95 ± 0.07	10.5 ± 3.54	丘间地
Ⅱ	30年生	34.0 ± 2.83	3.0 ± 0.71	1192.5 ± 74.25	10.5 ± 2.12	1.95 ± 0.21	13.0 ± 2.83	丘间地
Ⅲ	20年生	22.5 ± 3.54	1.9 ± 0.14	1320.0 ± 42.45	9.25 ± 1.77	1.7 ± 0.14	11.0 ± 4.24	丘间地

方，除去表层石块、植物残根等杂物后挖掘土壤剖面，按0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm三层取样，用四分法取5个样点各层的混合土样三份：一份装入事先准备的无菌塑料袋，带回室内风干处理，用以测定其机械组成和化学性质；一份用便携式车载冰箱在4℃条件下保存，带回实验室后测定土壤微生物数量；一份风干后粉碎，分别过孔径1 mm和0.25 mm筛，用于测定土壤酶活性。

土壤机械组成变化规律的测定采用筛分法和比重计法，并根据国际制土壤粒级划分标准将研究区土壤粒级分为粗砂粒(0.2～2.0 mm)、细砂粒(0.02～0.2 mm)、粉粒(0.002～0.02 mm)和黏粒(<0.002 mm)。土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定，全氮采用半微量开氏法测定，全磷采用NaOH熔融—钼锑抗比色法测定，全钾采用NaOH熔融—火焰光度法测定[18]；细菌、真菌和放线菌数量采用稀释平板法测定[19]；过氧化氢酶活性采用$KMnO_4$滴定法测定，碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定，蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定[20]。

1.5　数据统计分析

所有数据采用Microsoft Excel 2007、Surfer13.0和SPSS 19.0进行数据统计分析，其中，基本数据分析和图件制作采用Microsoft Excel 2007软件，风速等值线图采用Surfer13.0制图，多重比较、方差分析和相关性分析等采用SPSS 19.0软件。方差分析采用One-way ANOVA分析，各组均值间两两成对比较采用Duncan法，土壤保育效应因子与土壤养分、微生物数量、酶活性之间采用Pearson相关分析。所有数值均以平均值 ± 标准差表示。

2　结　果

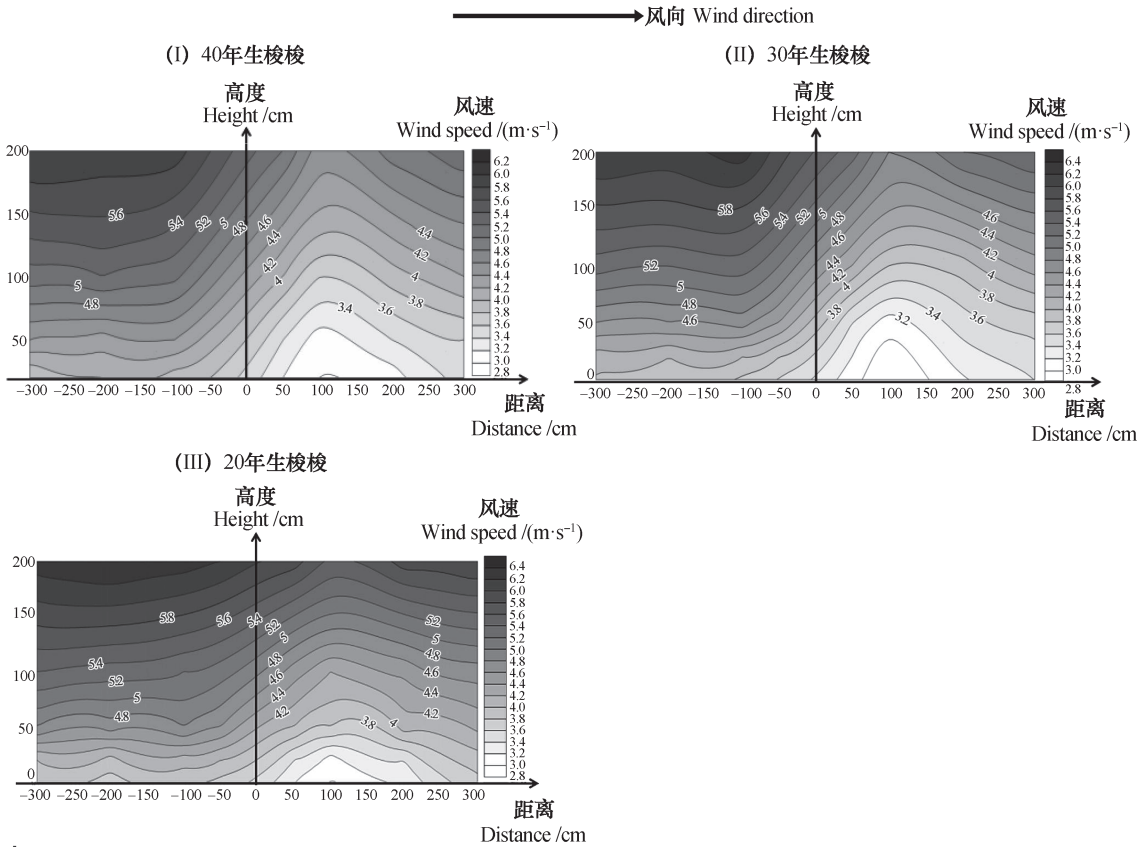
2.1　不同龄阶梭梭的防风效应

不同龄阶梭梭的防风效果及对风速的影响不同（图1），各龄阶梭梭背风面风速较迎风面显著减小。40年生梭梭最佳的防风效果位于背风面50～220 cm，30年生梭梭位于背风面30～220 cm，20年生梭梭位于背风面50～180 cm，说明各龄阶梭梭背风面防风固沙范围以30年生梭梭最大，40年生梭梭次之，20年生梭梭最小。

从图1可以看出，各龄阶梭梭在迎风面风速比较稳定，随着距离梭梭植株越近，风速逐渐减小，当风速到达背风面时，风速显著减小，且背风面的减小程度大于迎风面，当距离梭梭背风面2m以上时，风速略有增加，说明梭梭的防风和阻沙效应对风速有显著影响，且风速大小与距离梭梭植株的远近有显著的相关性。同一测点，各龄阶梭梭林风速随着高度的增加而增大，这与裸沙地地表的风速分布规律相一致。风速在梭梭植株的附近出现明显波动，且表现为顶端风速大，中下部风速小。

从表2可以看出，不同龄阶梭梭降低风速的幅度不同，且与植株的高度显著相关。在距离地表面20 cm、50 cm、100 cm、200 cm高度时，梭梭的风速降低幅度分别在13.75%、14.55%、15.00%、7.34%以上，说明梭梭中下部的防风效果较好，而在200 cm高度时风速降低幅度显著减小，中下部的风速降低幅度为顶端处的1.05倍～2.04倍，主要是由于此高度处于梭梭上部顶端，疏透度增大，降低风速的作用减小。

不同龄阶梭梭随着林龄的增长，风速降低幅度的均值由12.66%增大至20.41%。在距离地表面20 cm、50 cm、100 cm高度时，风速的降低幅度



注：图1中纵坐标为高度（cm），横坐标为距标准木距离（cm），其中坐标0点为梭梭林位置，负值表示迎风面，正值表示背风面，图内数据为风速（$m \cdot s^{-1}$），颜色越深代表风速越大Note: Y-axis of the coordinate represents height (cm), X-axis the distance from the wood (cm), 0 for location of the *Haloxylon ammodendron* forest, negative value for windward side, positive value for leeward side of *Haloxylon ammodendron* forest, the digit ,for wind speed ($m \cdot s^{-1}$), and the color for wind speed too, the darker the greater the wind speed

图1 梭梭林周围不同高度风速等值线图

Fig 1 Contour map of wind speed around the *Haloxylon ammodendron* forest relative to height above the ground

表现为30年生梭梭林>40年生梭梭林>20年生梭梭林，说明随着林龄的增长，梭梭林高度增大，疏透度减小，梭梭林防风作用增强；由于40年生梭梭林发生死亡和退化，其生长减缓，中下部的疏透度增大，故其防风作用较30年生梭梭林变弱。在200 cm高度时，风速的降低幅度表现为40年生梭梭林>30年生梭梭林>20年生梭梭林，主要是由于梭梭植株的高度不同影响所致。

表2 不同龄阶梭梭林周围平均风速降低百分比

Table 2 Mean wind reduction (%) around *Haloxylon ammodendron* forest relative to stand age

林地类型 Forest types	编号 Number	风速降低百分比 Wind reduction percentages/%			
		观测高度20 cm	观测高度50 cm	观测高度100 cm	观测高度200 cm
40年生梭梭林	Ⅰ	17.42 ± 1.45Ba	21.51 ± 1.96Bb	21.70 ± 2.01Bb	16.45 ± 1.39Ba
30年生梭梭林	Ⅱ	18.87 ± 1.62Bab	25.14 ± 2.19Bc	22.12 ± 2.08Bbc	15.51 ± 1.29Ba
20年生梭梭林	Ⅲ	13.75 ± 1.18Ab	14.55 ± 1.20Ab	15.00 ± 1.23Ab	7.34 ± 0.65Aa

注：同列不同大写字母表示同一高度的不同梭梭林风速降低程度差异显著（$P<0.05$）；同行不同小写字母表示同一梭梭林在不同高度下风速降低程度差异显著（$P<0.05$）Note: Different uppercase letters in the same column of height mean significant difference in wind speed reduction between stands different in age and lowercase letters in the same row indicate significant difference in wind reduction degree between heights in the same forest ($P<0.05$)

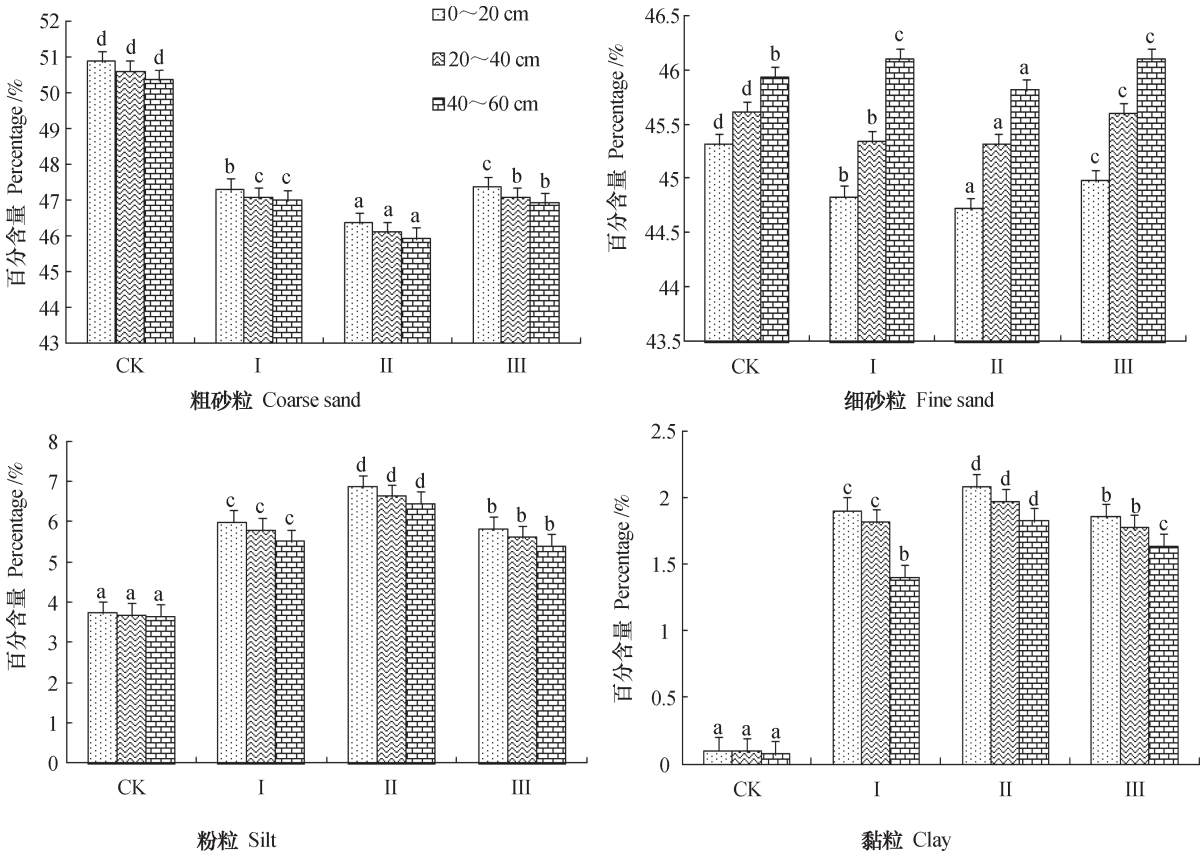
2.2　梭梭林土壤机械组成变化

从图2中可以看出，各龄阶梭梭林土壤中砂粒、粉粒、黏粒所占比例不同，粗砂粒、细砂粒、粉粒、黏粒含量变化范围分别为45.62%～50.87%、44.72%～46.10%、3.65%～6.85%、0.07%～2.08%，均表现为粗砂粒和细砂粒含量最高，粉粒含量次之，黏粒含量最低，且粉粒和黏粒所占比例远远小于粗砂粒和细砂粒所占比例。

由图2可知，在0～60 cm土层，梭梭林土壤粉粒和黏粒含量随土层深度增加略有减小，主要原因是裸沙地建立植被后，由于梭梭林对风蚀的细粒物质和降尘的阻挡和截留，表层土壤细粒组分不断增加；此外，随着梭梭林的生长，枯枝落叶经微生物分解而形成的腐殖质不断集中在土壤表层，使得土壤表层的腐殖质和黏粒的凝聚作用增强，形成的微团粒增多，有利于更多的粉粒和黏粒在表层胶结聚集。

不同龄阶梭梭三层土壤粉粒和黏粒含量均表现为裸沙地<20年生梭梭林<40年生梭梭林<30年生梭梭林，粗砂粒含量均表现为裸沙地>20年生梭梭林>40年生梭梭林>30年生梭梭林，可以看出，梭梭林三层土壤的粉粒和黏粒含量均显著大于裸沙地，粗砂粒含量均显著小于裸沙地，说明裸沙地建立植被后，土壤机械组成发生变化，粉粒和黏粒含量增大，粗砂粒含量减小，主要是因为梭梭林的覆盖保护使地表土壤被风吹蚀的作用减弱，枯落物的分解增加了土壤细粒组分和有机质，随之土壤容重减小，土壤的稳定性提高，有效地改善了土壤的物理性质。

不同龄阶梭梭林土壤机械组成存在差异，土壤黏粒和粉粒含量先随着树龄增加而增大，到30年左右达到最大值，后随树龄增大而逐渐减小；粗砂粒含量先随着树龄增加而减小，到30年左右达到最小值，后随树龄增大而逐渐增大。由此说明随着林龄的增长，林木阻挡和截留的细粒物质增多，梭梭林枯落物分解转化的有机质含量增加，改善了林地土壤结构。



注：同一土层上标不同小写字母表示差异达显著水平(P<0.05) Note: Different lowercase letters labeled in the same soil layer mean significant difference (P< 0.05)

图2　不同龄阶梭梭土壤机械组成比较

Fig. 2　Soil mechanical composition of the *Haloxylon ammodendron* forest relative to stand age

2.3 梭梭林改良土壤质量的效应

不同龄阶梭梭林对土壤质量各指标均有显著影响（表3）。不同龄阶梭梭林土壤的养分含量、微生物数量和酶活性不同，土壤质量各指标在三层土壤中均表现为30年生梭梭林>40年生梭梭林>20年生梭梭林。

从表3可知，不同龄阶梭梭林土壤养分含量均随土层深度增加而减小，表层0～20 cm土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量较40～60 cm土层分别高4.91%～33.52%、66.67%～133.33%、10.00%～43.75%、0.69%～5.16%，主要是由于梭梭林的枯枝落叶集中在土壤表层，经微生物分解转化成的养分元素富集在土壤表层，使表层土壤养分含量大于中间层和下层。土壤放线菌数量、真菌数量、蔗糖酶活性表现为表层>中间层>下层，主要是因为表层土壤枯落物丰富，透气性较好，有利于放线菌、真菌及蔗糖酶的生存；过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性变化趋势为下层大于中间层大于表层，土壤细菌数量呈不规律变化，说明梭梭林根系分布、养分含量大小、微生物特性、酶的来源等多种因素对细菌数量、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均产生重要影响。

与裸沙地相比，各龄阶梭梭林三层土壤中的养分含量、微生物数量和酶活性均有不同程度的增加，均为裸沙地的1.02倍以上，说明裸沙地梭梭林的建立使地表枯落物和地下根系逐渐增多，改善了土壤中微生物的生境条件，加速了枯落物的分解和腐殖质的转化速率，导致退化土壤质量不断恢复和改良。

表3 不同龄阶梭梭林土壤质量变化特征

Table 3 Soil quality of the *Haloxylon ammodendron* forest relative to stand age

土壤质量指标 Soil quality index	编号 Number	林地类型 Forest types	土层深度Soil depth/ cm		
			0～20	20～40	40～60
全氮Total nitrogen /(g·kg^{-1})	CK	裸沙地	0.02 ± 0.01Aa	0.01 ± 0.01Aa	0.01 ± 0.01Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	0.07 ± 0.02ABb	0.04 ± 0.02ABab	0.03 ± 0.01Aa
	Ⅱ	30年生梭梭林	0.1 ± 0.06Ba	0.08 ± 0.05Ba	0.06 ± 0.06Aa
	Ⅲ	20年生梭梭林	0.04 ± 0.02ABa	0.03 ± 0.02ABa	0.02 ± 0.01Aa
全磷Total phosphorus /(g·kg^{-1})	CK	裸沙地	0.23 ± 0.03Ab	0.19 ± 0.02Aab	0.16 ± 0.01Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	0.33 ± 0.08ABa	0.32 ± 0.05Ba	0.3 ± 0.04Ba
	Ⅱ	30年生梭梭林	0.4 ± 0.1Ba	0.36 ± 0.08Ba	0.32 ± 0.07Ba
	Ⅲ	20年生梭梭林	0.31 ± 0.06ABa	0.29 ± 0.06ABa	0.25 ± 0.05Ba
全钾Total potassium /(g·kg^{-1})	CK	裸沙地	23.07 ± 4.53Aa	22.32 ± 3.98Aa	22.11 ± 3.63Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	24.53 ± 5.19Aa	23.42 ± 5.06Aa	23.33 ± 4.94Aa
	Ⅱ	30年生梭梭林	24.87 ± 5.23Aa	23.93 ± 5.17Aa	23.65 ± 5.08Aa
	Ⅲ	20年生梭梭林	23.46 ± 4.82Aa	23.38 ± 4.74Aa	23.3 ± 4.65Aa
有机质Organic matter /(g·kg^{-1})	CK	裸沙地	1.71 ± 0.42Aa	1.58 ± 0.38Aa	1.43 ± 0.3Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	3.63 ± 0.83Ba	3.5 ± 0.89Ba	3.46 ± 0.85Ba
	Ⅱ	30年生梭梭林	4.74 ± 0.94Ba	3.62 ± 0.77Ba	3.55 ± 0.73Ba
	Ⅲ	20年生梭梭林	3.56 ± 0.75Ba	3.39 ± 0.71Ba	3.22 ± 0.62Ba
细菌Bacteria /(×10^5 CFU·g^{-1})	CK	裸沙地	18.04 ± 1.01Ab	27.83 ± 1.43Ac	11.91 ± 0.86Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	43.63 ± 1.96 Bb	47.52 ± 1.40Bc	30.23 ± 0.72Ca
	Ⅱ	30年生梭梭林	65.35 ± 1.53Cb	68.17 ± 2.03Cb	60.68 ± 2.41Da
	Ⅲ	20年生梭梭林	40.37 ± 2.85Bb	44.56 ± 2.63Bb	22.23 ± 3.01Ba
放线菌Actinomycetes /(×10^4 CFU·g^{-1})	CK	裸沙地	35.52 ± 1.52Ab	29.66 ± 5.40Ab	10.77 ± 1.08Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	84.79 ± 2.66Bb	81.80 ± 2.13BCb	70.64 ± 1.87Ca
	Ⅱ	30年生梭梭林	120.59 ± 3.27Cc	91.03 ± 2.28Cb	76.05 ± 1.50Da
	Ⅲ	20年生梭梭林	84.16 ± 5.58Bb	76.59 ± 3.35Bb	45.11 ± 4.76Ba

续表

土壤质量指标 Soil quality index	编号 Number	林地类型 Forest types	土层深度Soil depth/ cm		
			0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60
真菌Fungi /(×10^3 CFU·g^{-1})	CK	裸沙地	1.79 ± 0.16Ab	4.24 ± 0.24Ac	0.18 ± 0.03Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	45.26 ± 2.30Cc	20.40 ± 1.41Cb	11.31 ± 1.70Ca
	Ⅱ	30年生梭梭林	49.66 ± 0.22Dc	22.09 ± 2.16Cb	18.37 ± 1.18Da
	Ⅲ	20年生梭梭林	11.99 ± 1.52Bb	11.68 ± 1.30Bb	6.19 ± 0.24Ba
过氧化氢酶Catalase /(ml·g^{-1}·h^{-1})	CK	裸沙地	0.03 ± 0.01Aa	0.05 ± 0.01Aab	0.08 ± 0.01Ac
	Ⅰ	40年生梭梭林	0.06 ± 0.02Aa	0.08 ± 0.03ABa	0.11 ± 0.05Aa
	Ⅱ	30年生梭梭林	0.07 ± 0.04Aa	0.12 ± 0.05Ba	0.13 ± 0.03Aa
	Ⅲ	20年生梭梭林	0.04 ± 0.01Aa	0.06 ± 0.01Ab	0.09 ± 0.01Ac
蔗糖酶Sucrase /(mg·g^{-1}·$24h^{-1}$)	CK	裸沙地	25.04 ± 0.28Ac	22.09 ± 0.35Ab	20.05 ± 0.5Aa
	Ⅰ	40年生梭梭林	33.86 ± 0.5Cc	31.09 ± 0.44Cb	26.50 ± 0.56Ca
	Ⅱ	30年生梭梭林	48.71 ± 0.53Dc	37.03 ± 1.12Db	33.03 ± 0.43Da
	Ⅲ	20年生梭梭林	30.92 ± 0.89Bc	27.25 ± 0.9Bb	22.66 ± 0.49Ba
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase /(mg·g^{-1}·$24h^{-1}$)	CK	裸沙地	4.45 ± 0.15Aa	5.42 ± 0.24Ab	6.38 ± 0.49Ac
	Ⅰ	40年生梭梭林	8.69 ± 0.2Ca	11.89 ± 0.28Cb	16.03 ± 0.57Cc
	Ⅱ	30年生梭梭林	8.92 ± 0.28Ca	13.39 ± 0.31Db	21.04 ± 0.18Dc
	Ⅲ	20年生梭梭林	7.99 ± 0.36Ba	9.03 ± 0.13Bb	15.21 ± 0.12Bc

注：同一指标同列不同大写字母表示不同龄阶梭梭林在同一土层差异显著（P<0.05），同行不同小写字母表示同一龄阶梭梭林在不同土层差异显著（P<0.05）Note: Different uppercase letters in the same column of index mean significant difference in the same soil layer between stands different in age (P<0.05), and lowercase letters, significant difference between soil layers in the same stand (P<0.05)

2.4　梭梭林防风效应和改良土壤效应的相关性

梭梭林地防风蚀效应因子对土壤机械组成有显著影响，而风蚀区土壤机械组成与土壤养分含量、微生物数量和酶活性之间关系密切，对其进行相关性分析（表4），结果表明，梭梭林的风速降低程度与粗砂粒和细砂粒含量呈极显著负相关关系（P<0.01），相关系数达到了87.0%以上，与粉粒和黏粒含量呈极显著正相关关系（P<0.01），相关系数达到了94.6%以上。可以看出，梭梭林的风速降低程度越大，土壤中粗砂和细砂粒含量越小，粉粒和黏粒含量越高，说明通过营造梭梭林增大地表粗糙度，可以减小地表风速和风沙流流量，使风沙流中细小的沙粒不断在梭梭林周围沉积，进而改善土壤的机械组成。

土壤粉粒和黏粒含量与全磷、有机质、蔗糖酶、碱性磷酸酶以及微生物数量呈极显著正相关关系（P<0.01），相关系数达到了74.8%以上，说明土壤中粉粒和黏粒含量增加，形成有利于土壤有机质和养分元素积累的环境条件，最终改善土壤的养分质量和生物学特性，有利于梭梭林健康的生长。

从表4可看出，除全钾外，土壤养分含量、微生物数量及酶活性各指标间均呈显著正相关关系（P<0.05），相关系数达到了58.5%以上，说明土壤养分含量、微生物数量及酶活性间相互影响，相互制约，对外部环境的变化比较敏感，在梭梭林管护过程中应注意“木桶效应”和外界因素产生的不利影响。

3　讨　论

3.1　梭梭林防风蚀效应特征

梭梭林的防风蚀特性在风沙防治中起着至关重要的作用，梭梭林地上枝叶的覆盖和阻挡使近地表免受风力直接侵蚀，通过分散近地表的风动量以降低风速，进而拦截近地表风沙流中的沙粒并使其沉积，最终达到阻风拦沙的目的[21]。本研究中，不同龄阶的梭梭林保护土壤的效应不同(30年生梭梭林>40年生梭梭林>20年生梭梭林)，且背风面显著强于迎风面。梭梭林的风速降低程度越大，梭梭林保护土壤的效应就越强，越有益于土壤有机质的积累和土壤质量的改善。植被是控制风蚀的决定性因素，其高度差异对土壤风蚀具有重要影响[22]。试验中，同一观测点，当风通过梭梭林时，梭梭林近地表风速均随着高度增大而增大，越接近梭梭林顶

表4 梭梭林防风蚀效应因子与土壤机械组成的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of the factors of wind breaking effect with soil mechanical composition in *Haloxylon ammodendron* forests

指标 Index	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	有机质 Organic matter	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	风速降低程度 Wind speed reduction	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
全氮	1														
全磷	0.924**	1													
全钾	0.693*	0.685*	1												
有机质	0.827**	0.974**	0.645*	1											
细菌	0.738**	0.810**	0.236	0.784**	1										
放线菌	0.684*	0.848**	0.243	0.878**	0.929**	1									
真菌	0.603*	0.714**	0.201	0.737**	0.834**	0.829**	1								
过氧化氢酶	0.955**	0.918**	0.707*	0.830**	0.762**	0.686*	0.585*	1							
蔗糖酶	0.735**	0.788**	0.218	0.743**	0.993**	0.904**	0.792**	0.772**	1						
碱性磷酸酶	0.680*	0.838**	0.221	0.865**	0.936**	0.999**	0.827**	0.690*	0.914**	1					
风速降低程度	0.652*	0.839**	0.24	0.876**	0.885**	0.983**	0.803**	0.685*	0.865**	0.985**	1				
粗砂粒	−0.583*	−0.774**	−0.144	−0.842**	−0.869**	−0.978**	−0.833**	−0.569	−0.825**	−0.975**	−0.961**	1			
细砂粒	−0.647*	−0.711**	−0.083	−0.664*	−0.954**	−0.890**	−0.728**	−0.692*	−0.977**	−0.904**	−0.870**	0.809**	1		
粉粒	0.628*	0.791**	0.145	0.833**	0.928**	0.990**	0.849**	0.627*	0.897**	0.992**	0.969**	−0.990**	−0.882**	1	
黏粒	0.536	0.748**	0.134	0.833**	0.809**	0.955**	0.804**	0.514	0.759**	0.950**	0.946**	−0.994**	−0.746**	0.968**	1

注：**表示在 0.01 水平上显著相关，*表示在 0.05 水平上显著相关Note: ** and * means significant difference at the 1% and 5% level，respectively

端处，梭梭林对风速的影响越小，越接近梭梭林中部，梭梭林对风速的影响越大，主要是由于各龄阶梭梭林顶端疏透度大，越接近顶端处，梭梭林对风速的阻碍作用越小，而中部疏透度小，对风速的阻碍作用大，导致风速明显减弱。随着植被林龄的增大，其高度和覆盖度不断增大，对降低林地内的风速和改善小气候的作用显著[23]。本研究中，40年生梭梭林的防风作用较30年生梭梭林变弱，主要是由于人类活动不合理利用水资源使当地地下水位下降，导致需水量较大的40年生梭梭林发生死亡和退化[24]，使其疏透度增大，覆盖度减小，阻风拦沙的作用减弱。从梭梭林的防风固沙效果、改良土壤效应和可持续经营等方面综合考虑，30年生梭梭林更适合当地生境条件，它不仅防风固沙效果明显，而且改善流动沙丘土壤性状和微生物活性的能力较好。因此，在梭梭林的营造和管护过程中，对龄阶大于30年且出现明显退化的梭梭林应进行间伐、保水、补肥等外部干预措施，以保障其健康生长，可持续地发挥其防风固沙的生态作用。

3.2　梭梭林对土壤机械组成及土壤质量的改良效应

土壤机械组成是土壤质量的一个自然属性，表现出土壤的粗细状况，它是评价土壤质量的一个重要指标，对改良土壤的松紧程度、改善土壤水肥状况和防治土壤沙化具有重要作用[25]。不同粒径的颗粒含量对形成土壤团粒结构的影响作用不同，导致其防风蚀的性能也不同，黏粒与带负电荷的腐殖质结合后其通透性差，很难被微生物分解，不易被风吹蚀，抗风蚀性能较好。绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤中粉粒和黏粒所占比例远远小于粗砂粒和细砂粒所占比例，主要是由于研究区土壤以灰棕漠土和风沙土为主，成土母质多为砂砾质堆积物，质地较粗，细颗粒物质很少，加之当地属温带干旱荒漠气候，降雨量少，植被稀疏，风蚀作用强，粒径较小的粉粒和黏粒容易被风吹蚀，导致土壤质地以砂粒为主，其土壤质量不利于梭梭林的健康生长。唐炎林等[26]的研究表明，土壤中黏粒和粉粒等细小颗粒的含量越高，粗砂粒等大颗粒物质的含量越低，土壤中有机质、全氮、全磷和全钾的含量就越高。本研究的结果与此基本吻合，说明黏粒含量较高的土壤，其保持养分的能力较好。梭梭林对改善土壤机械组成和其生长的土壤环境有重要作用，本研究中，随着裸沙地梭梭林的恢复，土壤颗粒组成发生变化，黏粒含量趋于增多，砂粒减少，表层土壤中粉粒和黏粒的含量增加尤为显著，黏粒的增多有效地增加了土壤的养分含量和微生物数量，有利于梭梭林生境的改善，主要是由于林木根系通过穿透作用和根际效应既可以将土壤分割成细颗粒，又能将土粒和土壤中有机质和腐殖质胶结形成团粒结构，与林木根系伴生的土壤微生物通过时间、空间的梯度变化与根系不断相互影响，最终形成稳定的土壤群落结构[27]。随着林龄增长，30年生梭梭林土壤机械组成出现峰值和谷值，说明30年生的梭梭林处于生长旺盛期，受环境因素和地下水位下降的影响，使得林龄大于30年的梭梭林生存环境恶化，植物生长受到抑制，进入土壤的枯落物及分解转化的有机质相应减少，使得粉粒和黏粒含量减少，土壤质量下降。

土壤有机质、全量养分、微生物数量和酶活性是土壤肥力和生产力的主要指标，而有机质则是最关键的指标，其主要来自于地表枯落物与地下根系的分解补充和累积，有机质在土壤剖面的分布主要取决于有机残体归还量的多少和腐殖质在土体中淋溶、迁移、淀积的过程[28]。本研究中，随着裸沙地梭梭林的恢复，土壤中黏粒等细颗粒的增多导致了有机质含量的增大，使得土壤中的养分含量、微生物数量和酶活性均有不同程度的增加，从而导致土壤肥力质量和稳定性的升高，说明土壤中有机质含量的高低将对全量养分、微生物数量和酶活性产生重要的影响。刘乃君[29]对巴丹吉林沙漠东南缘人工梭梭林的土壤改良效应进行了研究，结果表明，在流动沙丘上人工建立梭梭林后，对林地土壤不仅可以起到防风固沙的作用，而且还可以提升土壤的养分含量，改良贫瘠的土壤。本研究中，不同龄阶梭梭林对土壤养分含量、微生物数量和酶活性的积累作用不同，以30年生梭梭林最大，主要是由于梭梭林建立后随着龄阶的增大，进入土壤的枯落物增多，经过土壤微生物和酶的分解和转化，致使土壤养分不断累积，微生物和酶的生存环境不断改善，在30年龄阶达到生长旺盛期，使其养分含量、微生物数量和酶活性较其他龄阶梭梭林高，说明研究区30年生梭梭林对土壤质量的改良作用较好。40年生梭梭林各指标较30年生梭梭林小，主要是因为40年生梭梭林受环境因素影响处于生长退化阶段，其改善土壤质量的作用不及30年生梭梭林。本研究

中，不同龄阶梭梭林土壤的养分含量、微生物数量和酶活性具有明显的垂直分布特征，但细菌数量、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性与其他指标的变化趋势不一致，主要是由于梭梭根系分布、养分含量大小、微生物特性、酶的来源等多种因素综合影响所致，具体原因尚需深入研究。

3.3 梭梭林土壤保育效应的相关性

植被在荒漠生态系统中发挥着重要作用，是荒漠生态系统中养分的主要供给者，其地下根系的生长可以有效改善土壤结构，地上植被的枯落物可以为土壤提供更多的营养物质[30]。植物措施保护土壤效应与改良土壤效应各因子间具有较好的相关性，曹成有等[31]的研究表明，固沙林的防风蚀效应因子对土壤机械组成有重要影响，随着固沙林保护土壤效应的进行，固沙林土壤的粉粒、黏粒含量增加，使容重、孔隙度等物理性质改善，进而显著提升土壤有机质、微生物数量等，有效地改良了风沙土土壤质量。本研究中，梭梭林的风速降低程度与粉粒和黏粒含量呈极显著正相关关系，说明梭梭林的防风固沙作用明显改善了土壤结构，有利于梭梭林枯落物分解转化后土壤养分含量的积累和微生物生存环境的改善。杨涛等[32]研究了科尔沁沙地固沙林土壤养分与生物学性质间的关系，认为固沙林土壤的有机质、微生物和酶活性三者间具有显著相关关系。本研究中，除全钾外，土壤养分含量、微生物数量及酶活性各指标间均呈显著正相关关系，这与杨涛等[32]的研究结果基本吻合。土壤粉粒和黏粒含量与全磷、有机质、蔗糖酶、碱性磷酸酶以及微生物数量呈极显著正相关关系，说明梭梭林的防风蚀作用使得地表的机械组成发生变化，进而对梭梭林土壤的物理性质、化学性质、微生物数量及酶活性产生了重要影响。

梭梭林的防风固沙效应是梭梭改良土壤效应的基础和前提条件，而梭梭改良土壤效应又为其健康生长提供保障。梭梭的枯落物是土壤中有机质的主要来源，土壤中有机质的积累可以促进土壤中氮和磷等养分含量的提升，也是增强土壤微生物数量和酶活性的主要方式，因此，提高退化土壤的有机质含量，对改良梭梭林土壤养分与生物学性质具有重要意义。梭梭改良土壤质量的同时也可以通过根系吸收土壤中的营养物质而健康生长，最终形成良性循环以利于生态环境的改善，所以梭梭林的健康生长是土壤肥力质量和生物学特性改善的关键。在今后河西地区的荒漠化防治和生态恢复的建设中，应该以土壤保育作用较好的30年龄阶的梭梭林为界，对龄阶大于30年且出现明显退化的梭梭林应及时采取外部干预措施。

4 结 论

梭梭林保护土壤的效应取决于梭梭的生长情况及树龄，梭梭林中下部对风速的阻碍作用较顶端处大，距离梭梭植株越近，风速逐渐减小，且背风面的减小程度大于迎风面；随着林龄的增长，风速降低幅度的均值增大，30年生梭梭林防风固沙范围达最大，表明健康梭梭林的防风蚀效应显著。各龄阶梭梭林土壤粉粒和黏粒所占比例远远小于粗砂粒和细砂粒，随土层深度增加，粉粒和黏粒含量略有减小，但均显著大于裸沙地；随着树龄增加，土壤黏粒和粉粒含量增大，粗砂粒含量减小，分别在30年时出现峰值和谷值；各龄阶梭梭林土壤的养分含量、微生物数量和酶活性各指标均表现为30年生梭梭林>40年生梭梭林>20年生梭梭林，且均为裸沙地的1.02倍以上。以上结果表明梭梭防风蚀效应可以有效改善土壤的机械组成，进而改善土壤质量，30年生梭梭林的土壤保育效果最好。梭梭林的风速降低程度与土壤的机械组成呈极显著相关关系，相关系数达到了0.87以上，土壤粉粒和黏粒含量与全磷、有机质、蔗糖酶、碱性磷酸酶以及微生物数量呈极显著正相关关系，相关系数达到了0.748以上，说明梭梭林土壤保育效应因子间均有较好的相关性，他们相互制约、互相促进，对梭梭林生长发育和土壤质量改善具有显著作用。

参 考 文 献

[1] 王长庭，王根绪，刘伟，等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较. 干旱区资源与环境，2013，27（9）：160—165
Wang C T，Wang G X，Liu W，et al. Comparison of soil mechanical composition and soil fertility at different grass-land types in alpine meadow（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2013，27（9）：160—165

[2] 贡璐，张雪妮，冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价. 土壤学报，2015，52（3）：

682—689
Gong L，Zhang X N，Ran Q Y. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of tarim river based on minimum data set（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2015，52（3）：682—689

［3］ 魏林源，刘立超，唐卫东，等. 民勤绿洲农田荒漠化对土壤性质和作物产量的影响. 中国农学通报，2013，29（32）：315—320
Wei L Y，Liu L C，Tang W D，et al. Effects of farmland desertification on soil properties and crop yields in minqin oasis（In Chinese）. Chinese Agricultural Science Bulletin，2013，29（32）：315—320

［4］ 吴汪洋，张登山，田丽慧，等. 青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益. 干旱区地理，2014，37（4）：777—785
Wu W Y，Zhang D S，Tian L H，et al. Mechanism and benefit of wind-prevention and sand-fixation of *Hippophae rhamnoides* forestation in Ketu Sandy Land around Qinghai Lake（In Chinese）. Arid Land Geography，2014，37（4）：777—785

［5］ Zhang P J，Yang J，Zhao L Q，et al. Effect of *Caragana tibetica nebkhas* on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau，China. Plant and Soil，2011，347（1/2）：79—90

［6］ Dong Z B，Gao S Y，Fryrear D W. Drag coefficients and roughness as disturbed by artificial standing vegetation. Journal of Arid Environments，2001，49（3）：485—505

［7］ 江凌，肖燚，饶恩明，等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响. 生态学报，2016，36（12）：3734—3747
Jiang L，Xiao Y，Rao E M，et al. Effects of land use and cover change（LUCC）on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2016，36（12）：3734—3747

［8］ 杨梅焕，朱志梅，曹明明，等. 毛乌素沙地东南缘不同沙漠化阶段土壤—植被关系研究. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2010，38（5）：181—187
Yang M H，Zhu Z M，Cao M M，et al. Study on the correlation of soil-vegetation in different desertification stages on the southeastern edge of Mu Us Sandy Land（In Chinese）. Journal of Northwest A&F University（Natural Science Edition），2010，38（5）：181—187

［9］ 赵鹏，徐先英，屈建军，等. 民勤绿洲荒漠过渡带人工梭梭群落与水土因子的关系. 生态学报，2017，37（5）：1496—1505
Zhao P，Xu X Y，Qu J J，et al. Relationships between artificial *Haloxylon ammodendron* communities and soil-water factors in Minqin oasis-desert ecotone（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2017，37（5）：1496—1505

［10］ 朱雅娟，贾志清，刘丽颖，等. 民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征. 中国沙漠，2011，31（2）：442—446
Zhu Y J，Jia Z Q，Liu L Y，et al. Soil water in planted *Haloxylon ammodendron* shrubland of different age outside Minqin Oasis（In Chinese）. Journal of Desert Research，2011，31（2）：442—446

［11］ 常兆丰，韩福贵，仲生年，等. 民勤荒漠区几种主要固沙植物群落的水分平衡特性. 干旱区地理，2012，35（1）：139—144
Chang Z F，Han F G，Zhong S N，et al. Characteristics of the water balance of plant communities in the Minqin Desert area（In Chinese）. Arid Land Geography，2012，35（1）：139—144

［12］ 陈芳，纪永福，张锦春，等. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件. 生态学杂志，2010，29（9）：1691—1695
Chen F，Ji Y F，Zhang J C，et al. Ecological conditions for natural regeneration of artificial *Haloxylon ammodendron* plantations in Minqin oasis（In Chinese）. Chinese Journal of Ecology，2010，29（9）：1691—1695

［13］ 刘有军，刘世增，纪永福，等. 民勤绿洲人工梭梭林群落结构及种群生态特征. 干旱区研究，2014，31（1）：94—99
Liu Y J，Liu S Z，Ji Y F，et al. Community structure and population ecological features of planted *Haloxylon ammodendron* in different habitats in Minqin Oasis（In Chinese）. Arid Zone Research，2014，31（1）：94—99

［14］ 罗青红，宁虎森，陈启民. 准噶尔盆地南缘人工梭梭林土壤理化特性时空动态研究. 水土保持研究，2016，23（6）：309—315
Luo Q H，Ning H S，Chen Q M. Spatiotemporal characteristic of soil physical and chemical properties in *Haloxylon ammodendron* stand at the southern margin of Junggar Basin（In Chinese）. Research of Soil and Water Conservation，2016，23（6）：309—315

［15］ 马瑞，王继和，刘虎俊，等. 不同密度梭梭林对风速的影响. 水土保持学报，2009，23（2）：249—252
Ma R，Wang J H，Liu H J，et al. Effection on wind speed of *Haloxylon ammodendron f*orest with different density（In Chinese）. Journal of Soil and Water

Conservation，2009，23（2）：249—252

［16］ 刘江，徐先英，张荣娟，等. 人工梭梭（*Haloxylon ammodendron*）林大沙鼠（*Rhombomys opimus*）鼠洞空间格局. 中国沙漠，2017，37（6）：1180—1188
Liu J，Xu X Y，Zhang R J，et al. Spatial pattern of holes of *Rhombomys opimus* in a *Haloxylon ammodendron* plantation site（In Chinese）. Journal of Desert Research，2017，37（6）：1180—1188

［17］ 席军强，杨自辉，郭树江，等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响. 草业学报，2015，24（5）：44—52
Xi J Q，Yang Z H，Guo S J，et al. Effects of *Haloxylon ammodendron* planting on soil physico-chemical properties and soil microorganisms in sandy dunes（In Chinese）. Acta Prataculturae Sinica，2015，24（5）：44—52

［18］ 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京：中国农业出版社，2000：25—114
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，2000：25—114

［19］ 程丽娟，薛泉宏. 微生物学实验技术. 西安：世界图书出版公司，2000：63—68
Cheng L J，Xue Q H. Experimental technique in microbiology technology（In Chinese）. Xi’an：World Book Publishing Company，2000：63—68

［20］ 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京：中国农业出版社，1986：256—312
Guan S Y. Soil enzyme and their research method（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，1986：256—312

［21］ 韩永伟，托学森，高吉喜，等. 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益. 生态学报，2010，30（19）：5185—5193
Han Y W，Tuo X S，Gao J X，et al. Ecosystem services radiation of significant eco-function area in the lower reaches of Heihe River（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2010，30（19）：5185—5193

［22］ 张瑞强，高天明，郭建英. 内蒙古希拉穆仁草原风蚀水平观测研究. 水土保持通报，2014，34（1）：178—181
Zhang R Q，Gao T M，Guo J Y. Observation and research on wind erosion in Xilamuren grassland area，Inner Mongolia（In Chinese）. Bulletin of Soil and Water Conservation，2014，34（1）：178—181

［23］ 石星，李卫，杨文斌，等. 低覆盖度行带式固沙林对带间小气候的影响. 干旱区资源与环境，2015，29（10）：117—121
Shi X，Li W，Yang W B，et al. Microclimatic characteristics and the effects of low coverage sand-fixing forest belts（In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2015，29（10）：117—121

［24］ 王继和，马全林. 民勤绿洲人工梭梭林退化现状、特征与恢复对策. 西北植物学报，2003，23（12）：2107—2112
Wang J H，Ma Q L. Study on restoration strategies，characteristics and status of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* communities at the edge of Minqin oasis（In Chinese）. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2003，23（12）：2107—2112

［25］ 刘作新，唐力生. 褐土机械组成空间变异等级次序地统计学估计. 农业工程学报，2003，19（3）：27—32
Liu Z X，Tang L S. Spatial variability estimation of cinnamon soil mechanical composition by rank-order geostatistics（In Chinese）. Transactions of the CSAE，2003，19（3）：27—32

［26］ 唐炎林，邓晓保，李玉武，等. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较. 中南林业科技大学学报（自然科学版），2007，27（1）：70—75
Tang Y L，Deng X B，Li Y W，et al. Comparison of the mechanical composition and soil fertility between tropical seasonal rain forest soil and rubber forest soil in Xishuangbanna（In Chinese）. Journal of Central South University of Forestry & Technology（Natural Science），2007，27（1）：70—75

［27］ 孙婧珏，孙跃志. 林木根系与根际微生物的相互作用. 世界林业研究，2015，28（2）：14—18
Sun J J，Sun Y Z. Interactions between tree roots and soil microorganisms in rhizosphere（In Chinese）. World Forestry Research，2015，28（2）：14—18

［28］ 王长庭，龙瑞军，王启基，等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮、磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系. 草业学报，2005，14（4）：15—20
Wang C T，Long R J，Wang Q J，et al. Distribution of organic matter、nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the Alpine meadow（In Chinese）. Acta Prataculturae Sinica，2005，14（4）：15—20

［29］ 刘乃君. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质的影响. 土壤通报，2008，39（6）：1480—1482
Liu N J. Effect of artificial *Haloxylon Ammodendron* forest on the physical and chemical properties of sand soil（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2008，39（6）：1480—1482

［30］ 胡婵娟，郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. 生态环

境学报，2012，21（9）：1640—1646
Hu C J，Guo L. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration（In Chinese）. Ecology and Environmental Sciences，2012，21（9）：1640—1646
［31］ 曹成有，蒋德明，全贵静，等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化. 水土保持学报，2004，18（6）：108—131
Cao C Y，Jiang D M，Quan G J，et al. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin Sandy Land（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2004，18（6）：108—131
［32］ 杨涛，徐慧，李慧，等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究. 水土保持学报，2005，19（3）：50—53
Yang T，Xu H，Li H，et al. Soil nutrient，microorganism and enzyme activity in *Pinus sylvestris* plantations（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，2005，19（3）：50—53

Soil Conservation Effect of *Haloxylon Ammodendron* Bushes in Hexi Oasis-Desert Ecotone

WANG Yanwu[1]　LUO Ling[2]　ZHANG Feng[1†]　CHEN Tianlin[3]
（1 *Gansu Institute of Soil and Water Conservation Sciences*，*Lanzhou* 730020，*China*）
（2 *College of Resource and Environment*，*Henan Polytechnic University*，*Jiaozuo*，*Henan* 454000，*China*）
（3 *Soil and Water Conservation Bureau*，*Department of Water Resources of Gansu Province*，*Lanzhou* 730000，*China*）

Abstract　【Objective】In fragile ecosystems of the arid regions, soil revegetation effect is closely related to soil conservation effect. *Haloxylon ammodendron* forest play a quite important role in soil quality evolution in oasis-desert ecozones by protecting and ameliorating the soil. Especially its wind-breaking and sand-fixing effects and its generation of litter, which decomposes and transforms into organic matter and soil nutrients, are the most direct external environmental factors that affect soil quality evolution the most significantly. To explore soil conserving and restoring effects of *Haloxylon ammodendron* forests, affecting factors of the effects and relationships between the factors, and internal mechanism of the effects, stands of *Haloxylon ammodendron* forest different in age were selected for the study in an attempt to provide a theoretical basis for management of soil quality in the Hexi Oasis-desert Ecotone.【Method】The paper adopted the concept of space as a substitute for time in typical sampling in the ecozone. Three stands of *Haloxylon ammodendron* forest different in age (20a, 30a and 40a) and a tract of bare land were set for long-term monitoring and soil sampling for analysis of soil mechanical composition, chemical properties, microbial population and enzyme activity, and multiple comparisons, variance analysis and correlation analysis were used to analyze variation rules and relationships between the factors.【Result】Results show that soil protecting effects of the forest varied with growth and age of the forest. Wind decreased gradually in speed when approaching the forest. The effect was more obvious at the lee side than at the windward side. At the height of 20 cm, 50 cm, 100 cm and 200 cm above the ground in the forest wind speed decreased by 13.75%, 14.55%, 15.0% and 7.34% or more, respectively. Obviously the wind reducing effect is higher in the middle and lower part of the forests than in the upper part, and about 1.05 ~ 2.04 times of that at the top of the plants. With the forest growing in age, the magnitude of wind reduction increased from 12.66% to 20.41%. In terms of wind reduction magnitude at the height of 20cm, 50cm and 100cm above the ground, the three stands displayed an order of stand 30 years old > stand 40 years old > stand 20 years old, but in terms of at the height of 200 cm, they exhibited a different order, i.e. stand 40 years old > stand 30 years

old > stand 20 years old. In the stands of *Haloxylon ammodendron* forest, regardless of age, the proportions of silt and clay were much lower that those of coarse sand and fine sand in the surface layer, and with the increase in soil depth, the contents of silt and clay decreased slightly, but were still significantly higher than that in the bare land. With the forest growing in age, the content of silt and clay increased and the content of coarse sand decreased, and both leveled off at the age of 30. The stands all peaked in nutrient content, microorganism population and enzyme activity at the age of 30, exhibiting an order of stand 30 years old > stand 40 years old > stand 20 years old, and were all over 1.02 times higher than those in the bare land. The content of soil nutrients decreased with soil depth. The populations of soil actinomycetes and fungi and the activity of invertase was the highest in the surface soil, then in the subsoil layer and the lowest in the bottom layer. The activity of catalase and alkaline phosphatase was just in a reverse order. No obvious regularity was observed for soil bacteria in population, but good relationships were observed of the factors of the soil conservation effect of *Haloxylon ammodendron* forest with soil mechanical composition, soil nutrient status, and microorganism population and enzyme activity. Wind breaking effect of the forest was significantly related to soil mechanical composition (r>0.87).【Conclusion】Considering the soil protecting and ameliorating effects of *Haloxylon ammodendron* forest, the forest 30 years in stand age is the most suitable for the local habitat conditions and the highest in soil conserving effect. So in management of *Haloxylon ammodendron* forests over 30 years in stand age, it is recommended to cut down trees selectively for thinning, and adopt water conserving and nutrient supplementing measures and some others so as to ensure healthy growth of the forests and enable them to keep on playing their ecological role in wind breaking and sand fixing in the ecozone.

Key words Oasis-desert Ecotone；*Haloxylon ammodendron* forest；Soil conservation；Restoring effect；Protection effect

（责任编辑：檀满枝）