第 49 卷 第 11 期
2013 年 11 月

林 业 科 学
SCIENTIA SILVAE SINICAE

Vol. 49，No. 11
Nov.，2 0 1 3

doi:10.11707/j.1001-7488.20131102

高寒沙地植被恢复区乌柳人工防护林对土壤的影响*

于 洋[1] 贾志清[1,2] 朱雅娟[1,2] 赵淑伶[3] 刘艳书[1,2] 刘海涛[1] 李清雪[1]

（1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所 北京 100091；2. 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站 共和 813000；
3. 中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091）

摘 要： 以不同恢复年限（6，11，16 和 21 年）的乌柳人工防护林为研究对象，以丘间低地为对照，研究高寒沙地不同林龄乌柳人工防护林对土壤水分含量、土壤有机质含量、土壤养分（全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾）含量和土壤 pH 值的影响。结果表明：乌柳林样地土壤含水量受林龄和深度的影响，上层土壤含水量变化较为剧烈；与对照相比，不同林龄乌柳林土壤有机质含量随恢复时间的增长显著增加，并呈现出一定的表聚性；在植被恢复过程中各林龄乌柳土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量变化差异显著（$P < 0.05$），同一林龄乌柳林上层土壤（深度 < 100 cm）全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量均高于下层；随植被恢复时间增长，土壤 pH 值逐渐降低，土壤碱性减弱；相关分析表明土壤有机质含量与土壤各养分含量之间呈显著线性正相关关系，土壤 pH 值与土壤各养分含量之间呈显著线性负相关关系。乌柳人工防护林能够使植被恢复区土壤化学性质不断改善，土壤肥力水平得到提高。

关键词： 高寒沙地；乌柳人工防护林；养分含量；改良土壤

中图分类号：S714.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1001－7488（2013）11－0009－07

Effects of *Salix cheilophila* Plantation on the Improving of Soil Properties in Vegetation Restoration Area of High-Cold Sandy Land

Yu Yang[1] Jia Zhiqing[1,2] Zhu Yajuan[1,2] Zhao Shuling[3] Liu Yanshu[1,2] Liu Haitao[1] Li Qingxue[1]

（1. *Institute of Desertification Studies*，*CAF* *Beijing* 100091；2. *Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station* *Gonghe* 813000；3. *Research Institute of Forestry*，*CAF* *Beijing* 100091）

Abstract： This study was conducted in restored *Salix cheilophila* plantations on high-cold sandy land，with the dune slacks served as the control，to study effects of different ages（6，11，16 and 21 years）of plantations on the soil water content，soil nutrients（soil organic matter，total nitrogen，nitrate nitrogen，ammonium nitrogen，available phosphorus and available potassium） content and soil pH value. The result showed that the soil water content in the plantation was influenced by the forest age and the soil depth（$P < 0.05$）. The water content in the top soil layers increased gradually with the extension of restoration time. The soil organic matters showed accumulation on the top soil layers compared with the lowland between dunes，and increased significantly with the extension of revegetation time. The content of the soil nutrients（soil organic matter，total nitrogen，nitrate nitrogen，ammonium nitrogen，available phosphorus and available potassium） varied significantly in different stand ages. In the same stand age，total nitrogen，nitrate nitrogen，ammonium nitrogen，available phosphorus，and available potassium contents in the upper soil layers（depth < 100 cm） were higher than the lower soil layers. Soil pH values decreased gradually with the extension of restoration time. Correlation analysis showed the soil nutrient contents were positively and linearly correlated with soil organic matters but negatively linearly correlated with soil pH values. The research demonstrated that the soil chemical properties and soil fertility levels were improved gradually after the establishment of *Salix cheilophila* plantations in the vegetation restoration area.

Key words： high-cold sand land；*Salix cheilophila* plantation；nutrient content；soil improvement

退化生态系统重建的核心是植被的恢复与重 建。青海是我国沙漠化土地主要分布地且沙漠化危

收稿日期：2012－09－11；修回日期：2013－09－10。

基金项目：国家林业公益性行业科研专项（201204203）；林业科学技术推广项目（[2011]26）。

* 贾志清为通讯作者。

害较为严重，共和盆地则是青海省沙漠化土地集中分布的地区之一，沙珠玉地区作为共和盆地沙化土地密集分布的地区，受气温低、海拔高的自然因素以及滥砍滥伐、过牧等人为活动的影响，环境恶化较为严重，土地沙化现象日益突出，采用人工手段进行植被恢复势在必行。自 19 世纪 50 年代末以来，该地区积极开展退耕还林、机械沙障、麦草方格和封禁等植被恢复措施，以有效防止沙化蔓延，诸多学者在该地区开展了大量的植被恢复试验，并建立生态站进行长期定位研究，取得了一定的科研成果，系统揭示了该地区土地退化原因，对植被恢复区内典型的植被生理特性进行了详尽报道(张登山，2009；刘海涛，2012)，但对该地区植被恢复过程中植被与土壤之间的交互机制研究较少。当前学者们对不同地区不同土地类型的植被恢复过程对土壤的影响研究较多(杨晓晖等，2005；安韶山等，2006；蒋德明等，2008；刘树林等，2008；左小安等，2009；占布拉等，2010；任学敏等，2012)，但在海拔高、气温低的高寒沙地，相关报道较少。

乌柳(*Salix cheilophila*)为杨柳科(Salicaceae)柳属多年生落叶灌木或小乔木，是我国特有种，其生命力较强、耐旱抗寒、耐风蚀、沙埋和轻度盐渍化，主要分布于甘肃、西藏、青海和宁夏等地，尤其在环境恶劣的西部地区，发挥着重要的水土保持、防风固沙功能。当前针对乌柳的研究主要集中在其群落特征以及水分生理特性等方面(朱雪林等，2011；刘海涛等，2012)，从生态服务角度出发，研究其改良土壤功能方面的报道较少。在共和盆地，乌柳已成为该地区开展植被恢复的主要树种，表现出较强的适应性，对高寒沙地防治沙化蔓延以及生态环境恢复发挥着重要作用。

本研究以青海省共和盆地高寒沙地植被恢复区不同林龄乌柳人工防护林为研究对象，采用空间代替时间的方法，深入研究乌柳防护林对土壤养分含量、土壤有机质含量和土壤 pH 值的影响，旨在探讨高寒沙地开展植被恢复过程中植被与土壤之间的交互作用，并对评价高寒沙地乌柳人工防护林生态系统改良土壤功能提供依据。

1 研究区概况

研究区位于青海省海南州共和县沙珠玉乡，地处共和盆地中西部(100°45′—100°30′E，36°03′—36°30′N)，海拔 2 871 ~ 3 870 m。属高原温带半干旱草原和干旱荒漠草原的过渡带，干旱、大风、寒冷是其主要的气候特点。年均气温 2.4 ℃；年均降水量 246.3 mm，且季节分配不均，干湿季明显，降水集中在 5—9 月，年均潜在蒸发量 1 716.7 mm，年均大风日数(风速≥17 $m\cdot s^{-1}$)50.6 天，年沙尘暴 20.7 天，气候异常干燥。其海拔高、气温低的气候条件决定了该地区高寒且干旱的自然特征。在植被恢复区内沙丘与丘间地交错分布，主要地貌类型为流动沙丘、半流动沙丘、固定沙丘和丘间低地。该区地带性土壤类型有栗钙土和棕钙土，非地带性土壤有风沙土和草甸土。研究区内主要人工固沙乔木有青杨(*Populus cathayana*)、小叶杨(*Populus simonii*)和河北杨(*Populus hopeiensis*)，主要灌木有乌柳、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和枸杞(*Lycium chinense*)。

2 研究方法

样地设置及野外取样均在国家林业局青海共和荒漠生态定位观测研究站植被恢复区内进行，选择 4 个林龄(6，11，16 和 21 年)的乌柳林，同时选择 1 块造林前的丘间低地(20 m × 20 m)进行对照研究。

2011 年 8 月，在各林龄乌柳林内设置 3 块20 m × 20 m 的样地，进行每木检尺，记录各样地内乌柳的树高、冠幅及基径(表 1)，并在各样地内选择 4 株标准株，在各标准株冠幅边缘用土钻采集土壤样品，每个样点分 0 ~ 10，10 ~ 20，20 ~ 30，30 ~ 50，50 ~ 100，100 ~ 150 和 150 ~ 200 cm 共 7 个土层进行取样。各样地同一土层土壤样品 4 次重复，四分法取出足够样品，4 次重复取样的土壤样品一部分置于铝盒中用于测定土壤含水量，另一部分带回室内自然风干用于土壤化学性质的测定。

4 次重复取样的土壤样品去除残留的枯落物后过 2 mm 筛，一部分用于测定 pH 值。部分土样经研磨后再过 0.25 mm 筛，用于测定土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量。使用 PHS-4 智能型酸度计测定土壤 pH 值，高温外热重铬酸钾氧化 - 容量法测定土壤有机质含量，半微量凯氏定氮法测定全氮含量，酚二磺酸比色法测定硝态氮含量，水杨酸 - 次氯酸盐光度法测定铵态氮含量，有效磷和速效钾含量分别采用 $NaHCO_3$ - 钼锑抗混合试剂比色法和火焰光度计法测定。土壤铝盒带回后用 1/100 的电子天平(0.01 g)称其湿质量，在 105 ℃下干燥 24 h 后称其干质量，计算土壤含水量(林大仪，2004)。

表 1　样地概况①

Tab. 1　General situation of sample plots

林龄 Stand age/a	地理位置 Location	海拔 Elevation/m	树高 Tree height/m	基径 Basal diameter/cm	冠幅 Crown/m	
					东西 East & west	南北 South & north
6	100°13′48″E 36° 15′02″N	2 873	2.03 ±0.16a	1.51 ±0.90a	1.27 ±0.34a	1.32 ±0.35a
11	100° 13′41″E 36°15′00″N	2 873	2.83 ±0.41b	2.94 ±0.37b	1.31 ±0.25ab	1.38 ±0.31a
16	100° 14′14″E 36° 14′38″N	2 873	3.10 ±0.70c	4.37 ±0.65c	1.42 ±0.17b	1.42 ±0.20a
21	100° 15′14″E 36° 14′32″N	2 874	4.80 ±0.40d	6.27 ±0.54d	1.86 ±0.26c	1.82 ±0.25b

①同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。Different letters in the same column indicate significant differences（$P<0.05$）.

采用 SAS 9.2 统计软件中的方差分析程序（PROC ANOVA）进行统计分析，并用最小显著差数法（LSD）进行多重比较，Sigmaplot1 2.0 软件绘图。

3　结果与分析

3.1　不同林龄乌柳林地土壤含水量变化特征

图 1 表明，在 0 ~ 10 cm 土层，21 年生乌柳林土壤含水量显著高于其他 3 个林龄（$P<0.05$），而 6，11 和 16 年生乌柳林土壤表层含水量之间差异不显著（$P>0.05$），随恢复年代的增加表层土壤含水量逐渐升高；在 10 ~ 20 cm 土层，各林龄土壤含水量变化与表层相同，但同一林龄 10 ~ 20 cm 土层土壤含水量显著高于表层（$P<0.05$）；在 20 ~ 30 cm 土层，21 年生乌柳林土壤含水量显著高于其他 3 个林龄（$P<0.05$），而其他 3 个林龄含水量变化表现为 6 年生 > 16 年生 > 11年生；在 30 ~ 50 cm 土层，6，11 和 16 年生乌柳林土壤含水量达到最大值，但各林龄含水量之间差异不显著（$P>0.05$），表现为 21 年生 > 11 年生 > 16 年生 > 6 年生；在 50 ~ 100 及 100 ~ 150 cm 土层，各林龄土壤含水量差异不显著（$P>0.05$），而在 150 ~ 200 cm 土层，6 年生土壤含水量显著低于其他 3 个林龄（$P<0.05$）。综上所述，乌柳林样地土壤含水量受林龄和深度的影响，0 ~ 50 cm土层土壤含水量变化较为剧烈。

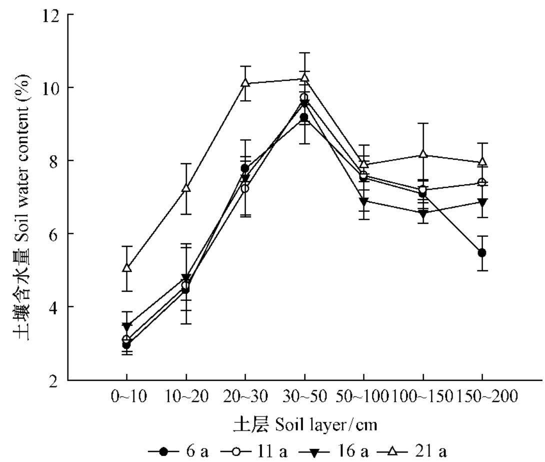

图 1　不同林龄乌柳人工林土壤含水量随深度变化特征

Fig. 1　Variation characteristics of soil water content with depth in different stand aged *S. cheilophila* plantations

3.2　不同林龄乌柳林地土壤有机质含量变化特征

由图 2 可知，不同林龄乌柳林土壤有机质含量随恢复时间的增长而增加，方差分析说明恢复年限对土壤有机质含量有显著影响（$P<0.05$）。各林龄土壤有机质分布呈现出一定的表聚性，除 6 年生乌柳林与对照外均在表层达到最高。在 0 ~ 10 cm 土层，各林龄土壤有机质含量均显著高于对照（$P<0.05$），21 与 16 年生显著高于 11 和 6 年生，且 11 年生显著高于 6 年生（$P<0.05$），表现为 21 年生 > 16 年生 > 11 年生 > 6 年生 > 对照。在 10 ~ 20 cm 土层，21 与 16 年生无显著差异，但显著高于 11 和 6 年生（$P<0.05$），11 与 6 年生之间土壤有机质含量差异不显著（$P>0.05$），6 年生土壤有机质含量在该层最高。在 20 ~ 30 cm 土层，各林龄之间土壤有机质含量差异显著（$P<0.05$），6 年生显著高于 11 年生（$P<0.05$），而 11 年生与对照在该层差异不显著（$P>0.05$），21 年生土壤有机质含量最高。在 30 ~ 50 cm 土层，21 年生土壤有机质含量显著高于 11 和 6 年生（$P<0.05$），但与 16 年生差异不显著（$P>0.05$），16 年生显著高于 6 年生（$P<0.05$），但 16 年生与 11 年生之间以及 11 年生与 6 年生之间无显著差异（$P>0.05$）。在 50 ~ 100 cm 土层，11 年生与 6 年生之间差异显著（$P<0.05$）。在 100 ~ 150 cm 土层，6 年生与对照之间无显著差异，21 与 16 年生之间无显著差异，这也与 150 ~ 200 cm 土层变化相同。随植被恢复年代的增加，各林龄土壤有机质含量分别提高 38.5%，52.9%，64.3% 和 68.7%。

3.3　不同林龄乌柳林地土壤全氮含量变化特征

由图 3 可知，各林龄之间土壤全氮含量呈现出

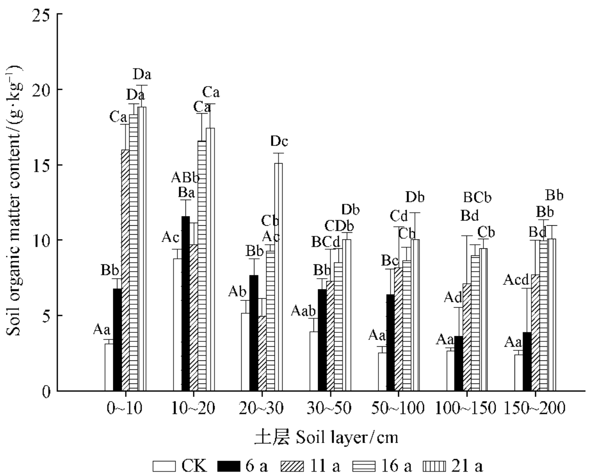

图 2 不同林龄乌柳人工林土壤有机质含量变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil organic matter content in different aged *S. cheilophila* plantations

不同大写字母表示同一土层不同林龄之间差异显著，不同小写字母表示同一林龄不同土层之间差异显著($P<0.05$)，下同。Different uppercase letters indicate significant difference in different stand ages, different lowercase letters indicate significant difference in different soil depth ($P<0.05$), the same below.

随恢复年限增加而增加的趋势，且各土层均表现为21年生>16年生>11年生>6年生>对照。在土壤表层，6和11年生与丘间低地之间土壤全氮含量无显著差异($P>0.05$)，而16和21年生与其他林龄之间差异显著($P<0.05$)。在10~20 cm土层，6和11年生土壤全氮含量显著高于对照，但11与16年生之间无显著差异($P>0.05$)，而21年生土壤全氮含量显著高于其他林龄($P<0.05$)。在20~30 cm土层，6和11年生与对照之间土壤全氮含量无显著差异($P>0.05$)，而16和21年生与其他乌柳之间差异显著($P<0.05$)。在30~50 cm土层，6和11年生与对照之间土壤全氮含量无显著差异($P>0.05$)，而16和21年生与其他林龄之间差异显著($P<0.05$)。在50~100 cm土层，21年生土壤全氮含量显著高于其他林龄，而其他林龄无显著差异。在100~150 cm土层，21年生土壤全氮含量依旧最高，但与11和16年生差异不显著($P>0.05$)。在150~200 cm土层，16年生全氮含量高于其他样地。土壤全氮未出现与土壤有机质类似的表聚性。与对照相比，各林龄样地随植被恢复年代的增加土壤表层全氮含量分别增加17.3%，24.2%，38.3%和56.0%。

各林龄之间土壤硝态氮含量变化见图4。在土壤表层，对照样地硝态氮含量显著低于其他样地，而其他林龄之间硝态氮含量差异不显著($P>0.05$)。在10~20 cm土层，各林龄硝态氮含量均达到最高值，21年生显著高于其他林龄($P<0.05$)，而6，11和16年生之间差异不显著。在20~30 cm土层，16和21年生含量显著高于6和11年生($P<0.05$)，但16与21年生之间差异不显著，6与11年生之间也无显著差异($P>0.05$)。在30~50 cm土层，16年生硝态氮含量显著高于其他林龄($P<0.05$)，6，11与16年生之间硝态氮含量差异不显著($P>0.05$)。在50~100 cm土层，11，16和21年生硝态氮含量无显著差异，但显著高于6年生($P<0.05$)。在100~150 cm土层，16与21年生硝态氮含量显著高于其他林龄($P<0.05$)，但二者间差异不显著($P>0.05$)，且11年生硝态氮含量显著高于6年生($P<0.05$)。在150~200 cm土层，16与21年生硝态氮含量无显著差异($P>0.05$)，21年生硝态氮含量显著高于11年生，3个林龄硝态氮含量均显著高于6年生($P<0.05$)。

图5表明，除10~20 cm，同一土层不同林龄铵态氮含量在数值上表现为21年生>16年生>11年生>6年生>对照。在土壤表层，21年生铵态氮含量显著高于其他林龄($P<0.05$)，16年生铵态氮含量显著高于6年生但与11年生无显著差异($P>0.05$)。在10~20 cm土层，21年生铵态氮含量显著高于其他林龄($P<0.05$)，11年生铵态氮含量虽高于16年生，但二者之间无显著差异($P>0.05$)。在20~30 cm土层，6，11和16年生之间铵态氮含量差异不显著($P>0.05$)，但显著低于21年生($P<0.05$)。在30~50 cm土层，21与16年生铵态氮含量无显著差异($P>0.05$)，但21年生铵态氮含量显著高于11年生($P<0.05$)，而16与11年生之间铵态氮含量差异不显著($P>0.05$)。在50~100 cm土层，21年生铵态氮含量显著高于16年生($P<0.05$)，6与11年生之间铵态氮含量差异不显著($P>0.05$)。在100~150 cm土层，16与21年生铵态氮含量显著高于6和11年生($P<0.05$)，而6和11年生之间铵态氮含量无显著差异($P>0.05$)。在150~200 cm土层，21年生铵态氮含量显著高于16年生($P<0.05$)，6和11年生与对照之间无显著差异($P>0.05$)。

3.4 不同林龄乌柳林地土壤有效磷含量变化特征

图6表明，在土壤表层，6，11和16年生土壤有效磷含量显著低于21年生($P<0.05$)，且三者之间无显著差异($P>0.05$)。在10~20 cm土层，21年生土壤有效磷含量显著高于其他林龄，16年生土壤有效磷含量与11及6年生有效磷含量无显著差异($P>0.05$)。在20~30 cm土层，各林龄土壤有效

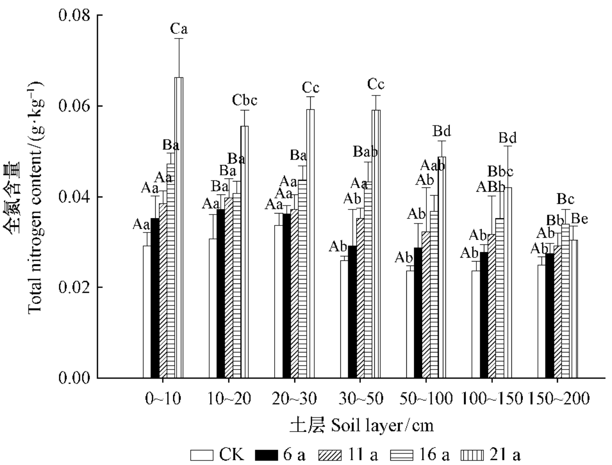

图 3　不同林龄乌柳人工林土壤全氮含量变化特征

Fig. 3　Variation characteristics of total nitrogen content in different aged *S. cheilophila* plantations

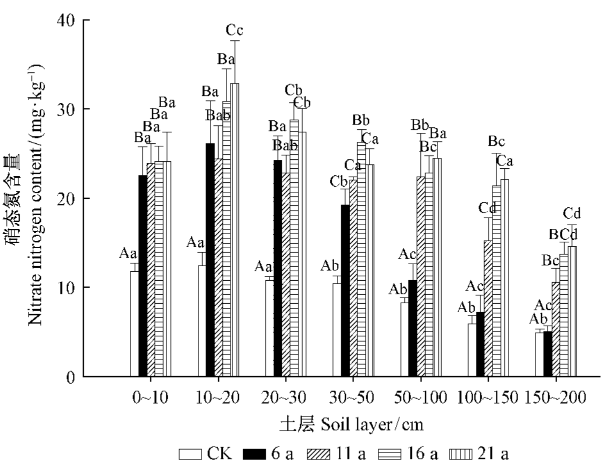

图 4　不同林龄乌柳人工林土壤硝态氮含量变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of soil NO_3^--N content in different aged *S. cheilophila* plantations

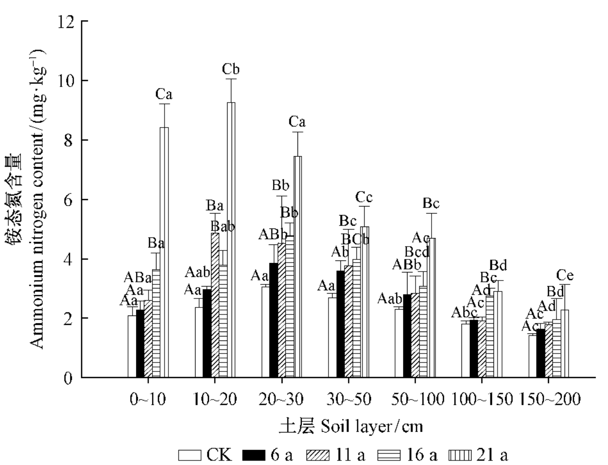

图 5　不同林龄乌柳人工林土壤铵态氮含量变化特征

Fig. 5　Variation characteristics of soil NH_4^--N content in different aged *S. cheilophila* plantations

磷含量无显著差异（$P>0.05$），这也与30～50 和 50～100 cm 土层各林龄有效磷含量表现相同，但各林龄土壤有效磷含量显著高于对照（$P<0.05$）。在 100～150 cm 土层，各林龄乌柳林之间土壤有效磷含量与对照之间均无显著差异（$P>0.05$），这也与 150～200 cm 土层有效磷含量变化一致。

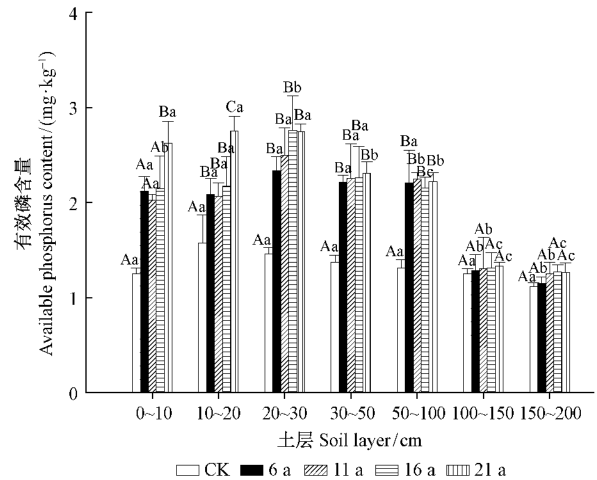

图 6　不同林龄乌柳人工林土壤有效磷含量变化特征

Fig. 6　Variation characteristics of soil available phosphorus content in different aged *S. cheilophila* plantations

3.5　不同林龄乌柳林地土壤速效钾含量变化特征

图 7 表明，在土壤表层，16 和 21 年生乌柳林速效钾含量显著高于 6 和 11 年生（$P<0.05$），且 16 和 21 年生之间及 6 和 11 年生之间差异不显著（$P>0.05$）。在 10～20 cm 土层，各林龄之间土壤速效钾含量无显著差异（$P>0.05$），但是显著高于对照（$P<0.05$）。在 20～30 和 30～50 cm 土层，各林龄土壤速效钾含量与 10～20 cm 土层变化一致。各林龄速效钾含量在 50～100，100～150 和 150～200 cm土层与对照之间差异不显著（$P>0.05$），但同一林龄不同深度表现不同，21 年生速效钾含量在 50～100 cm 土层显著高于 150～200 cm 但与 100～150 cm 土层差异不显著（$P>0.05$）。

3.6　不同林龄乌柳林地土壤 pH 值变化特征

由图 8 可知，各样地土壤 pH 值为 8.43～8.80，该地区土壤碱性较强，对照土壤 pH 值在各土层均最高。同一土层不同林龄乌柳林土壤 pH 值随植被恢复年代的增加呈逐渐降低的趋势。方差分析结果表明，6 年生乌柳林土壤 pH 值在 0～10 cm 表层显著高于 16 和 21 年生（$P<0.05$），但与 11 年生差异不显著（$P>0.05$），16 年生土壤 pH 值显著高于 21 年生（$P<0.05$）但与 11 年生无显著差异（$P>0.05$）。在10～20 cm 土层，6 年生显著高于其他 3 个林龄（$P<0.05$），而其他 3 个林龄 pH 值在该层无显著差异（$P>0.05$）。在 20～30 cm 土层，6 年生土

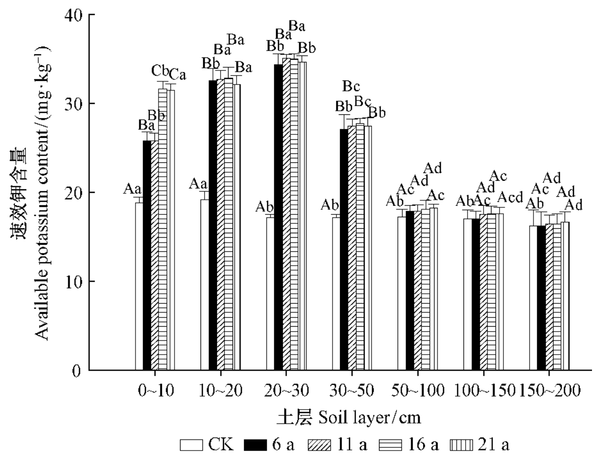

图 7 不同林龄乌柳人工林土壤速效钾含量变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of soil available potassium content in different aged *S*。*cheilophila* plantations

壤 pH 值显著高于 21 年生($P<0.05$),而与 11 和 16 年生无显著差异($P>0.05$)。在 30 ~ 50 cm 土层,6 年生土壤 pH 值与 11 年生无显著差异($P>0.05$),但显著高于 16 年生($P<0.05$),而 16 与 21 年生之间无显著差异($P>0.05$)。在 50 ~ 100 cm 土层,6 年生土壤 pH 值显著高于 21 年生($P<0.05$),而与 11 和 16 年生无显著差异($P>0.05$)。在 100 ~ 150 及 150 ~ 200 cm 土层各林龄乌柳林 pH 值变化与 30 ~ 50 cm 土层一致。

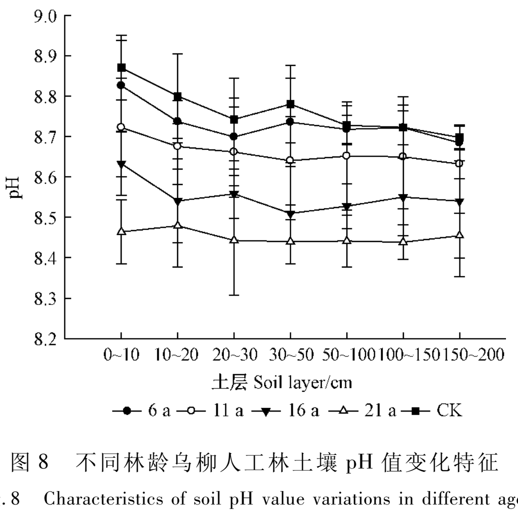

图 8 不同林龄乌柳人工林土壤 pH 值变化特征

Fig. 8 Characteristics of soil pH value variations in different aged *S. cheilophila* plantations

3.7 植被恢复过程中土壤有机质含量、pH 值与土壤养分含量之间的相关性

研究表明,在植被恢复过程中,土壤有机质含量与土壤全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾的相关系数分别为 0.669,0.606,0.612,0.530 和 0.536,且$P<0.01$,即存在显著的线性正相关关系;土壤 pH 值与土壤全氮、硝态氮、铵态氮和有效磷之间的相关系数分别为 −0.526,−0.434,−0.376 和 −0.270,且$P<0.01$,即存在显著的线性负相关关系;土壤 pH 值与速效钾含量在 0.05 水平下显著负相关。

4 结论与讨论

高寒沙地植被恢复区与其他沙漠地区一样,土壤氮素和磷素较为匮乏(张瑞等,2010),不同林龄乌柳人工防护林的营建使土壤水热条件得到了改善,与丘间低地相比,土壤中有机质和养分含量逐渐增加,有效提高了土壤肥力。

刘海涛等(2012)通过研究乌柳水势以及保水力后发现 11 年生乌柳正值生长快速上升期,属挥霍型水分利用策略,而 25 年生乌柳处于发育的成熟阶段,水分利用日趋稳定。正是由于林龄的不同以及不同生长阶段生理状态的差异导致了不同深度土壤含水量的差异,这也是不同林龄乌柳林土壤含水量达到最大时土壤深度不同的原因所在。表层与大气环境接触,水分受温度、地表风速等影响而交换活跃,蒸散较快,且受草本盖度的影响,所以含水量在表层较低。总体来说,各林龄 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层土壤含水量优于土壤表层,21 年生乌柳林生长发育较为成熟,土壤有机质含量较高,林下土壤得到改良,土壤水分状况最好。

本研究表明,土壤有机质含量出现了表聚性,随植被恢复时间的增长,有机质含量显著增加。这主要是由于植被恢复过程中,植被每年向地表提供大量凋落物,经微生物腐解后土壤有机质含量增加,这与丁文广等(2012)在甘肃中部干旱区的研究结果相似。各林龄浅层土壤(0 ~ 50 cm)有机质含量高于深层土壤,深层土壤有机质含量变幅较小。研究表明,不同林龄乌柳林和同一林龄不同深度土壤有机质和养分含量的差异,也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体现(刘海涛,2012)。植被恢复过程中土壤养分的变化,实则是植被对养分的消耗与累积的动态过程。根系对养分的利用也决定着土壤养分的变化,这直接导致土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量之间的差异(Jobbágy *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2008)。细根的周转也对土壤全氮含量产生重要影响(Nadelhoffer *et al.*, 1985; Pregitzer *et al.*, 2004; 郭大立等,2007),不同土层全氮含量的差异也与细根的分布密切相关。

随植被恢复时间增加,土壤有机质分解,释放出有效磷,有效磷含量总体增加。在 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层,21 年生有效磷含量显著高于其他林龄。

在研究不同林龄乌柳根系分布特征时，发现随林龄的增加，各林龄菌根的分布逐渐增加，21 年生乌柳根系周围分布大量菌根，而菌根在磷素循环中发挥着重要作用（Stutter *et al.*，2012；Brady *et al.*，1999）。

随植被恢复时间增加，有机质中的钾元素转化为速效钾被植物吸收利用，钾素的输入途径主要有大气沉降和矿物风化，一般来说，钾元素的输入大于输出（孙向阳，2005）。由于该地区母质形成于17 000年以前，土壤中富含钾矿物，不同林龄乌柳因自身生理特征差异对速效钾的消耗和积累表现不同，故 16 和 21 年生速效钾含量在表层显著高于 6 和 11 年生。在 20 ~ 100 cm 土层，4 个林龄速效钾含量无显著差异，但显著高于对照。

在海拔高、气温低的高寒地区，植被恢复是改良土壤的有效方式，本文研究结果为今后在干旱区进行植被恢复与重建提供了科学依据。在今后的研究中，可以从土壤酶活性及微生物生物量方面入手，系统研究植被恢复对土壤生物学性质的影响。

参　考　文　献

安韶山，黄懿梅. 2006. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究. 林业科学，18(2):643 – 647.

丁文广，魏银丽，杨军梅，等. 2012. 甘肃省中部干旱区植被恢复对土壤养分变化的影响研究. 干旱区资源与环境，26(1):159 – 162.

郭大立，范萍萍. 2007. 关于氮有效性影响细根生产量和周转率的四个假说. 应用生态学报，18(10):2354 – 2360.

蒋德明，曹成有，李雪华，等. 2008. 科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应. 生态环境，17(3):1135 – 1139.

林大仪. 2004. 土壤学实验指导. 北京:中国林业出版社.

刘海涛. 2012. 高寒沙地乌柳生理生态特性及植被恢复过程研究. 北京：中国林业科学研究院博士学位论文.

刘海涛，贾志清，朱雅娟，等. 2012. 高寒沙地不同林龄乌柳的水分生理特性及叶性状. 应用生态学报，23(9):2370 – 2376.

刘树林，王　涛，屈建军. 2008. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究. 中国沙漠，28(4):611 – 616.

任学敏，杨改河，秦晓威，等. 2012. 巴山冷杉 – 牛皮桦混交林乔木更新及土壤化学性质对更新的影响. 林业科学，48(1):1 – 6.

孙向阳. 2005. 土壤学. 北京:中国林业出版社.

杨晓晖，王葆芳，江泽平. 2005. 乌兰布和沙漠东北缘三种豆科绿肥植物生物量和养分含量及其对土壤肥力的影响. 生态学杂志，24(10):1134 – 1138.

占布拉，卫智军，黄伟华，等. 2010. 科尔沁草原不同类型沙地土壤养分研究. 干旱区资源与环境，24(11):135 – 138.

张登山. 2009. 青海高原土地沙漠化及其防治. 北京:科学出版社.

张　瑞，张景波，曹良图. 2010. 干旱区土地利用和土壤改良及植被恢复方式对沙地养分的恢复效应. 水土保持研究，17(4):153 – 157.

左小安，赵学勇，赵哈林，等. 2009. 沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响. 生态环境学报，18(2): 643 – 647.

朱雪林，黄清麟，张　超，等. 2011. 西藏乌柳群落特征. 山地学报，29(1):116 – 122.

Brady N C，Weil R R. 1999. The nature and properties of soils. New York: Prentice Hall.

Huang G，Zhao X，Su Y，*et al.* 2008. Vertical distribution，biomass，production and turnover of fine roots along a topographical gradient in a sandy shrubland. Plant and Soil，308(1): 201 – 212.

Jobbágy E G，Jackson R B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications，10(2): 423 – 436.

Nadelhoffer K J，Aber J D，Melillo J M. 1985. Fine roots，net primary production，and soil nitrogen availability: a new hypothesis. Ecology，66(4): 1377 – 1390.

Pregitzer K S，Zak D R，Burton A J，*et al.* 2004. Chronic nitrate additions dramatically increase the export of carbon and nitrogen from northern hardwood ecosystems. Biogeochemistry，68(2): 179 – 197.

Stutter M I，Shand C A，George T S，*et al.* 2012. Recovering phosphorus from soil: a root solution. Environmental Science and Technology-Columbus，46(4): 1977 – 1978.

（责任编辑　于静娴）