

雅鲁藏布江江当宽谷区固沙措施对流沙理化性质的改良效应

庞营军¹, 屈建军², 陈怀顺³, 谢胜波², 肖建华²

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 分析雅鲁藏布江江当宽谷区流沙治理技术(砾石覆盖+人工植被+围封)对流沙理化性质的改良效应, 为区域荒漠化治理工作提供理论指导。[方法] 对比分析固沙区和流动沙丘土壤机械组成、有机质和养分等指标开展研究。[结果] 采用植物和工程相结合的固沙措施, 在流沙表面覆盖砾石、播种固沙植物, 并对该区域进行围封后, 沙丘表面植被盖度增加, 流沙基本固定。与流动沙丘相比, 固沙区土壤的黏粒、粉粒明显增多。固沙区土壤的有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾含量比流动沙丘高; 尤其是土壤表层 0—5 cm, 分别比流动沙丘高出 634.3%, 268.0%, 506.5%, 38.3%, 343.8%, 66.7%。固沙区 0—5 cm 土层的 pH 值比流动沙丘降低了 11.5%; 电导率比流动沙丘增加了 268.1%。[结论] 该项流沙治理技术(砾石覆盖+人工植被+围封)的固沙和改良土壤理化性质作用明显, 适宜在该区推广使用。

关键词: 雅鲁藏布江; 砾石覆盖; 流沙; 改良

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0067-06

中图分类号: S156.5

文献参数: 庞营军, 屈建军, 陈怀顺, 等. 雅鲁藏布江江当宽谷区固沙措施对流沙理化性质的改良效应 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 067-072. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.012

Improvement Effects of Sand Fixing Measures on Shifting-sand Physical and Chemical Properties in Jiandang Wide Valley Area of Yarlung Zangbo River

PANG Yingjun¹, QU Jianjun², CHEN Huaishun³, XIE Shengbo², XIAO Jianhua²

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] Analyzing the responses of shifting-sand physical and chemical properties improvement to sand control technologies (gravel cover + artificial vegetation + enclosure) in Jiandang wide valley area of Yarlung Zangbo River, to provide theoretical guidance for regional desertification control. [Methods] Soil mechanical composition, organic matter and nutrients, etc. were comparatively analyzed between the samples of the sand fixed region and the ones of the mobile sand dune. [Results] After combined plantation and engineering measures were applied, such as gravel laying over the mobile dune surface, sand-fix-capable plant seeds sowing and enclosing, the sand of dune surface was fixed and the vegetation cover increased. As compared with the mobile sand dune, the contents of clay and silt particles increased significantly. The contents of soil organic matter, total nitrogen, alkaline hydrolytic nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and potassium in sand fixed region were higher than those of the corresponding values of mobile sand dune. Especially in 0—5 cm soil layer, greater improvements of 634.3%, 268.0%, 506.5%, 38.3%, 343.8%,

收稿日期: 2016-02-25

修回日期: 2016-03-22

资助项目: 林业公益性行业科研专项“青藏铁路沿线沙害成因机制与分布规律”(201504401-3); 中国博士后科学资助项目(2015T81069); 铁道部科技研究开发计划项目(2011G027-D)

第一作者: 庞营军(1984—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 助研, 主要从事荒漠化治理方面的研究。E-mail: pangyingjun@caf.ac.cn.

通讯作者: 屈建军(1959—), 男(汉族), 陕西省高陵县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事风沙地貌与风沙工程研究。E-mail: qujianj@lzb.ac.cn.

66.7 % of the fixed dune were obtained against the ones of the mobile sand dune, respectively. pH value at 0—5 cm soil layer in sand fixed region decreased by 11.5 % in comparison with the one of the mobile sand dune; whereas the value of conductivity at 0—5 cm soil layer in sand fixed region increased by 268.1 % than the value of the mobile sand dune. [Conclusion] The sand control technologies (gravel cover+artificial vegetation+enclosure) obviously fixed mobile sand and improved the soil physical and chemical properties, and were suitable for popularization and application in these region.

Keywords: Yarlung Zangbo River; gravel mulch; shifting sand; improvement

雅鲁藏布江流域中上游地区土壤发育程度低,气候干旱多风,冻融侵蚀和水力侵蚀为风沙灾害的形成提供了物质基础,土地沙漠化严重^[1];尤其是河流宽谷地区,河流相、洪积相、坡积相等沙质沉积物丰富,相对平坦的地形为风沙堆积提供了有利场所,河谷风沙地貌发育广泛^[2]。植物固沙措施不仅能增加地表粗糙度,降低风速,消弱与抑制风沙流活动;而且固沙植物发达的根系能固结周围的沙粒,枯枝落叶等的堆积能增加土壤有机质,促进成土作用,使流沙趋于固定^[3]。植被和土壤是构成陆地生态系统的重要组成部分,两者相互依存相互制约。固沙植物对流沙理化性质的影响,不仅是风沙工程学的主要研究内容,同时也是恢复生态学的研究热点之一。由于流沙表面沙物质移动性强,而固沙植物种子或者幼苗生存能力弱,所以在实施植被固沙措施以前通常需要提前布设工程防沙措施,发挥防风固沙效益,同时保护固沙植物成长。砾石覆盖作为一种古老的抗旱栽培措施,广泛应用于甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区、宁夏回族自治区和陕西省的部分干旱地区。近些年,也被广泛用于各种风沙防治工程,例如莫高窟风沙防护工程^[4]、青藏铁路风沙防护工程^[5]等。国内外学者就砾石覆盖对水分入渗、蒸发以及土壤理化性质的影响^[6-7],也开展了大量的研究工作。本文旨在研究植物与工程措施相结合的流动沙丘固沙技术及围栏封育对流沙机械组成、有机质和养分等的影响,定量评估该流沙治理技术对流沙理化性质的改良效应,为该地区的荒漠化治理工作提供理论指导。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区日喀则市江当乡境内 318 国道旁的雅鲁藏布江中游宽谷区。该区年均气温 6.7 °C,年均空气湿度 5.13 mb,年降雨 469.9 mm,年蒸发量 2 068.6 mm。年平均风速 1.47 m/s,主导风向西南;年平均大风日数(≥ 8 级)19 d^[8]。该区主要天然植被有砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)、藏沙蒿(*Artemisia wellbyi*)、白草(*Pennisetum centrasiticum*)、固沙草(*Orinus thoroldii*)等。

1.2 研究方法:

1996 年,选择河流阶地上的一个新月形沙丘(29°20′26″N,89°21′12″E),在该沙丘上撒播油蒿、花棒和柠条种子,并用砾石覆盖沙丘表面。2013 年 5 月,该沙丘已经变为了固定沙丘,植被覆盖度约 30%左右;此时该沙丘上生长最多的是乡土植物砂生槐,也存活有少量人工种植的油蒿、花棒和柠条。同时,选取附近的一个未采用固沙措施的流动新月形沙丘(29°20′21″N,89°21′4″E)作为对照。在该固沙区和流动沙丘的迎风坡中部分别随机选取 3 个采样点挖掘剖面,在 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 处取样品约 500 g;固沙区和流动沙丘对应层位的 3 个样品分别混合成 1 个样品。

使用马尔文激光粒度仪测定土壤机械组成;土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法;全氮采用半微量开氏法;碱解氮采用碱解扩散法;全磷采用 H₂SO₄-HClO₄法;速效磷用 NaHCO₃提取法;全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法;速效钾采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法^[9]。pH 值以 1:2.5 土水比悬液,电导率以 1:5 土水比悬液,使用德产 Multi-line F/SET-3 分析仪直接测定。

2 结果与分析

2.1 机械组成

研究区流动沙丘固定后,0—40 cm 土层的黏粒、粉粒明显增多;且黏粒和粉粒随土壤深度增加而逐渐减少(表 1)。主要是由于沙丘经砾石覆盖和植被恢复后,沙丘表面风速减弱,大量风积物堆积、沉降在土壤表层,使其细物质组分增多;而土壤下层虽然不受风的影响,但由于大气降水的渗透和植物地下部分的参与,使下层土壤机械组成发生相应改变^[10-11]。

2.2 有机质

由图 1 可以看出,流动沙丘的有机质含量垂直方向差异较小,各土层有机质含量变化区间为 1.32~1.61 g/kg。固沙区 0—40 cm 土层中有机质含量从表层向底部逐渐递减,其中 0—5 cm 土层的有机质含量最高,为 10.11 g/kg;30—40 cm 土层的有机质含

量最低,为 1.72 g/kg。

固沙区 0—40 cm 土层的有机质平均含量为 3.71 g/kg, 约是流动沙丘的 2.6 倍, 其中固沙区 0—5 cm 土层的有机质是流动沙丘的 7.3 倍。土壤有机质的来源主要包括微生物、植物、动物和人类活动。固沙区植被的残落物和根系为土壤提供了大量有机质来源, 导致其土壤有机质含量远高于流沙区。

表 1 固沙区和流动沙丘的机械组成 %

| 土层/cm | 沙区 | 黏粒 (<2 μm) | 粉粒 (2~20 μm) | 砂粒 (2~2 000 μm) |
|-------|------|------------|--------------|-----------------|
| 0—5 | 固沙区 | 0.69 | 3.40 | 95.91 |
| | 流动沙丘 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 5—10 | 固沙区 | 0.31 | 1.66 | 98.02 |
| | 流动沙丘 | 0.00 | 0.92 | 99.08 |
| 10—20 | 固沙区 | 0.09 | 0.85 | 99.06 |
| | 流动沙丘 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 20—30 | 固沙区 | 0.54 | 2.02 | 97.45 |
| | 流动沙丘 | 0.09 | 0.99 | 98.92 |
| 30—40 | 固沙区 | 0.12 | 1.16 | 98.72 |
| | 流动沙丘 | 0.02 | 1.00 | 98.98 |

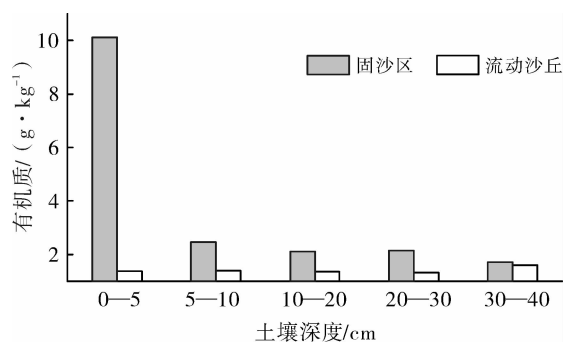


图 1 研究区固沙区和流动沙丘土壤有机质对比

2.3 全氮和碱解氮

由图 2 可以看出, 流动沙丘 0—5 cm 土层的全氮含量最少, 仅为 0.19 g/kg; 5—40 cm 土层的全氮含量略高, 变化区间为 0.23~0.25 g/kg。固沙区 0—5 cm 土层的全氮含量最高, 为 0.70 g/kg; 5—40 cm 土层的全氮含量显著减少, 变化区间为 0.22~0.27 g/kg。固沙区的 0—10 cm 土层的全氮含量比流动沙丘对应深度土层高, 其中 0—5 cm 土层的全氮含量比流动沙丘高 268.0%, 而 5—10 cm 土层仅比流动沙丘高 10.5%。固沙区 10—30 cm 土层的全氮含量比流动沙丘略低。

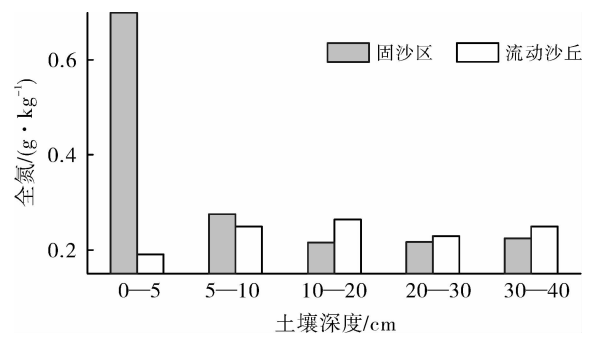


图 2 研究区固沙区和流动沙丘土壤全氮对比

图 3 表明, 流动沙丘 30—40 cm 土层的碱解氮含量最高, 为 10.5 mg/kg; 10—20 cm 土层的碱解氮含量最低为 5.9 mg/kg。整体来看, 固沙区的碱解氮随着深度增加而逐渐减少; 其中 0—5 cm 土层的碱解氮含量最高, 为 38.2 mg/kg; 30—40 cm 土层的碱解氮含量最少, 为 7.6 mg/kg。

固沙区 30—40 cm 土层的碱解氮含量比流动沙丘略低; 其余各土层都比流动沙丘高。固沙区 0—5 cm 的碱解氮含量是流动沙丘的 6.1 倍; 5—10, 10—20, 20—30 cm 的碱解氮含量分别是流动沙丘对应层次 1.5, 1.7, 1.8 倍。

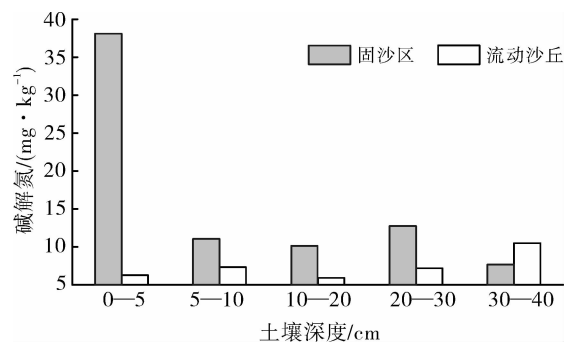


图 3 研究区固沙区和流动沙丘土壤碱解氮对比

土壤中的氮最初主要来自于母质, 随着土壤的发育外源氮素输入逐渐增多, 主要来源于生物固氮和大气干湿氮沉降, 少量来源于闪电的高能固氮^[12]; 除此之外, 土壤有机质的分解、生物残体的降解以及根系分泌物等也是土壤氮素输入的重要部分^[13]。固沙区的砾石和植物能减少土壤风蚀, 固定降尘, 滞留在土壤内的大气氮沉降量增多。此外, 固沙区植物生长发育过程中的枯枝落叶等, 一方面可以促进微生物活动, 从而提高土壤固定大气中气态氮的水平; 另一方面其在微生物、土壤酶等作用下的降解也可以为土壤提供直接的氮素来源。固沙区碱解氮含量高于流动沙丘的最主要原因

可能是有机质含量高,有机态氮的氨化和硝化作用速率快。

2.4 全磷和速效磷分析

由图 4 可以看出,流动沙丘的全磷含量随深度增加逐渐增大;但 20—30 cm 土层例外,其全磷含量最低,仅为 0.63 g/kg。固沙区 0—40 cm 土层的全磷含量大致上随土壤深度增加而逐渐减小,与流动沙丘的变化趋势相反;其中 0—5 cm 土层的全磷含量最高,为 0.94 g/kg。

固沙区 0—30 cm 土层的全磷含量比流动沙丘约高 18.8%;而 30—40 cm 土层的全磷含量比流动沙丘低 14.3%。

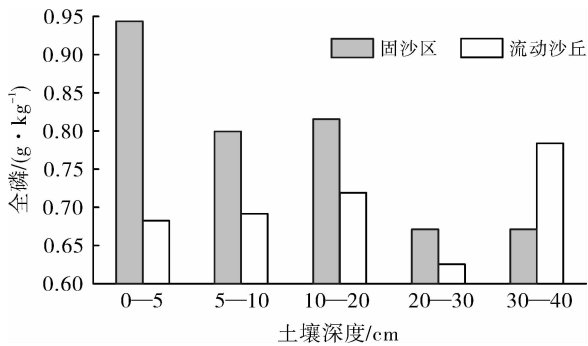


图 4 研究区固沙区和流动沙丘土壤全磷对比

图 5 表明,流动沙丘 0—40 cm 土层的速效磷含量垂直方向上没有明显的变化规律;其中 20—30 cm 土层的速效磷含量最高,为 15.01 mg/kg;5—10 cm 土层的速效磷含量最低,为 5.84 mg/kg。固沙区 0—40 cm 土层的速效磷含量自地表向下先减少后增加;10—20 cm 土层的速效磷含量最低,仅为 4.70 mg/kg;0—5 cm 土层的速效磷含量最高,为 40.67 mg/kg。

固沙区 0—5,5—10,30—40 cm 土层的速效磷含量分别比流动沙丘对应深度土层高 343.8%,94.1%和 117.1%。而固沙区 10—20 cm 土层的速效磷含量比流动沙丘低 38.8%;20—30 cm 土层的速效磷含量与流动沙丘差异较小。

该固沙区和流动沙丘的成土母质背景相同,但固沙区植被生长发育过程中从土壤中吸收大量的磷元素,而植物的枯枝落叶会在土壤表层累积,增加了土壤有机质;而土壤有机磷一般会随有机质的增加而增加^[14],因此导致固沙区 0—20 cm 土层的全磷高于流沙区。土壤中速效磷的含量与土壤全磷含量、土壤微生物、土壤酸碱度和电导率等密切相关^[15]。固沙区

0—20 cm 土层的全磷含量明显高于流沙区,而 5—20 cm 土层的速效磷并没有明显增加,这一定程度上说明土层全磷含量高,有效磷未必就含量高;因此今后的流沙治理工作,还应适当注意创造磷元素有效化的条件。

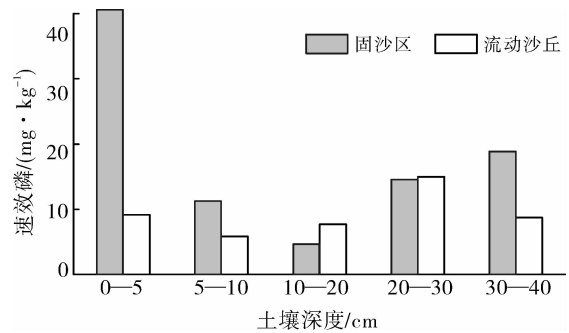


图 5 研究区固沙区和流动沙丘土壤速效磷对比

2.5 全钾和速效钾分析

图 6 表明,流动沙丘、固沙区各土层的全钾含量垂直方向上差异都较小。其中,流动沙丘 0—5 cm 土层的全钾含量最高,为 19.0 g/kg;30—40 cm 土层的全钾含量最少,仅为 17.0 g/kg。固沙区除 5—10 cm 土层的全钾含量为 17.0 g/kg,其余各层全钾含量都为 18.0 g/kg。

固沙区 0—5,5—10 cm 土层的全钾含量比流动沙丘分别低 5.3%,5.6%;30—40 cm 土层的全钾含量比流动沙丘约高 5.9%。10—20,20—30 cm 土层的全钾含量和流动沙丘一致。土壤中的钾主要以矿物钾的形态存在,而有机质的钾含量一般低于矿物质,因此,土壤中有机质的增加对土壤矿物钾有“稀释效应”^[16]。

固沙区表层 0—10 cm 土层的有机质含量大大高于流动沙丘,有机质对土壤矿物钾的“稀释效应”应该是固沙区 0—10 cm 土层的全钾含量低于流动沙丘的主要原因。

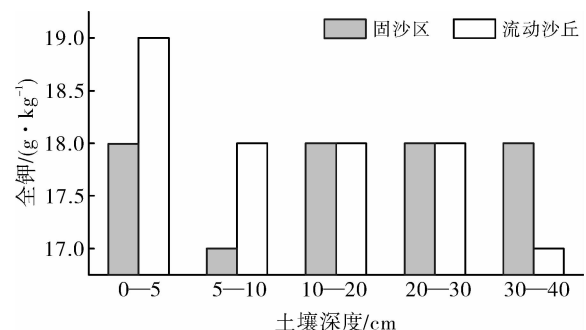


图 6 研究区固沙区和流动沙丘土壤全钾对比

由图7可以发现,固沙区和流动沙丘的速效钾含量都随土壤深度增加而逐渐减小。流动沙丘0—5 cm土层的全钾含量最高,为90.0 mg/kg,30—40 cm土层的全钾含量最低,为60.0 mg/kg。固沙区0—5 cm土层的全钾含量最高,为150 mg/kg;30—40 cm土层的全钾含量最低,为70.0 mg/kg。

固沙区各层土壤速效钾含量都比流动沙丘高,0—40 cm土层的平均速效钾含量比流动沙丘高38.9%。固沙区0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm土层的速效钾含量分别比流动沙丘对应土层高66.7%,42.9%,28.6%,28.6%,16.7%。土壤速效钾以交换性钾为主,交换作用的强弱主要受交换性钾的吸附位置、黏粒矿物种类、陪伴离子和钾饱和度等影响^[15]。固沙区土层有机质和黏粒含量高,有机质和黏粒对钾有较好的保持和储存作用,能促进土壤钾的交换作用,因而能提高土壤中的速效钾含量^[16-17]。此外,有机质分解产生的有机酸以及根系分泌物等也能促进土壤矿物钾的释放^[18]。

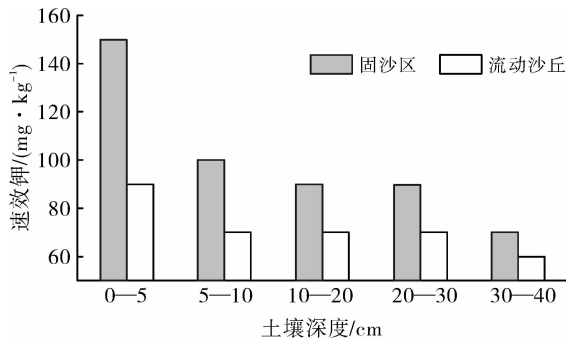


图7 研究区固沙区和流动沙丘土壤速效钾对比

2.6 pH值和电导率分析

由图8可知,流动沙丘0—40 cm范围内各层的pH值垂直方向上差异较小,介于9.06~9.17之间,表明该流动沙丘土壤呈强碱性。固沙区0—5 cm土层的pH值最小,为8.04,呈微碱性;其余各层pH值差异较小,介于8.95~9.02之间,呈强碱性。

固沙区0—5 cm土层的pH值比流动沙丘降低了11.5%;其余各土层的pH值比流动沙丘略小。这主要是因为固沙区的枯枝落叶较多,其分解产生有机酸,一定程度上能降低土壤pH值^[19]。除此之外,固沙区植物根系呼吸产生的CO₂溶于水生成的碳酸,也会降低土壤pH值^[15]。

由图9知,流动沙丘0—40 cm范围内土层的电导率垂直方向上差异较小,介于109.2~125.5 μS/cm之间。固沙区0—5 cm土层的电导率为462.0 μS/cm,明显大于其余各层;其余各层的电导率介于114.1~122.2 μS/cm之间。

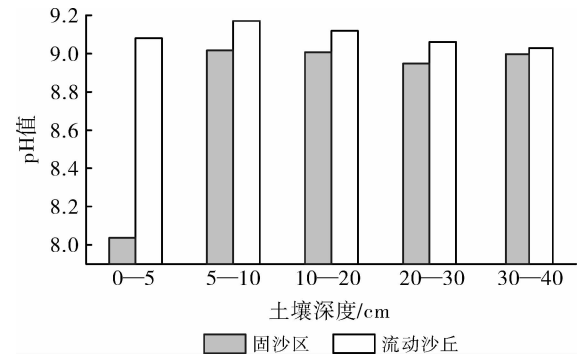


图8 研究区固沙区和流动沙丘pH值对比

固沙区0—5 cm土层的电导率明显大于流动沙丘,是流动沙丘的3.7倍。固沙区5—40 cm土层的电导率和流动沙丘差异较小;5—10,20—30,30—40 cm土层的电导率比流动沙丘略大,差值介于2.1和13.0 μS/cm之间;10—20 cm土层的电导率比流动沙丘略小,差值为1.5 μS/cm。

固沙区0—5 cm土层的电导率比流动沙丘高的原因主要与植物残落物中的可溶性盐的积累和沉积有关^[20]。

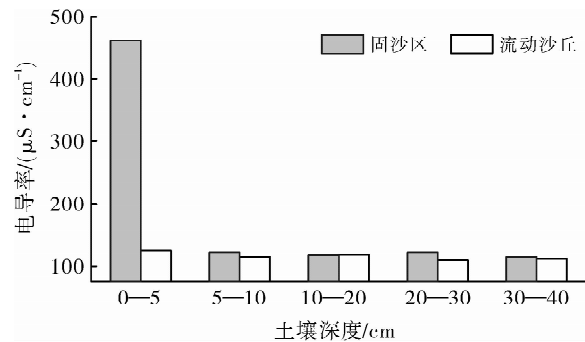


图9 研究区固沙区和流动沙丘土壤电导率对比

3 结论

(1) 采用植物和工程相结合的固沙措施,在流沙表面覆盖砾石、播种固沙植物,并对该区域进行围封后,沙丘表面植被盖度增加,流沙基本固定。雅鲁藏布江流域砾石资源丰富,因此,该流沙治理技术适宜在该区推广使用。

(2) 与流动沙丘相比,固沙区土壤的机械组成得到了改善,黏粒、粉粒明显增多。

(3) 与流动沙丘相比,固沙区土壤的有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾含量明显增高;尤其是土壤表层0—5 cm,分别比流动沙丘高出634.3%,268.0%,506.5%,38.3%,343.8%,66.7%。

(4) 与流动沙丘相比,固沙区土壤表层 0—5 cm 土层的 pH 值降低了 11.5%;土壤电导率增加了 268.1%。

(5) 本研究中流沙理化性质的改善,是砾石覆盖和地表植被共同作用的结果,但无法定量区分其作用大小。因此,应该加强该方面研究,以更好地评估防沙治沙措施的效益,为区域荒漠化防治提供指导。

[参 考 文 献]

- [1] 孙明,沈渭寿,李海东,等. 雅鲁藏布江源区风沙化土地演变趋势[J]. 自然资源学报,2010,25(7):1163-1171.
- [2] 李森,董光荣,申建友,等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式[J]. 中国科学(D辑):地球科学,1999,29(1):88-96.
- [3] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [4] 张伟民,王涛,薛娴,等. 敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系探讨[J]. 中国沙漠,2000,20(4):409-414.
- [5] 张克存,屈建军,牛清河,等. 青藏铁路沿线砾石方格固沙机理风洞模拟研究[J]. 地球科学进展,2010,25(3):284-289.
- [6] 关红杰,冯浩,吴普特. 土壤砾石覆盖对入渗和蒸发影响研究进展[J]. 中国农学通报,2008,24(12):289-293.
- [7] Qiu Yang, Xie Zhongkui, Wang Yajun, et al. Long-term effects of gravel-sand mulch on soil organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau of Northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(1):46-53.
- [8] 刘志民. 西藏“一江两河”中部流域沙漠化土地综合整治研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [10] 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[J]. 水土保持学报,2004,18(6):108-131.
- [11] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究,2007,26(3):518-524.
- [12] Galloway J N, Schlesinger W H, Levy H, et al. Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995,9(2):235-252.
- [13] 徐兴良,白洁冰,欧阳华. 植物吸收土壤有机氮的研究进展[J]. 自然资源学报,2011,26(4):715-724.
- [14] 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,等. 西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素[J]. 水土保持学报,2005,19(1):75-78.
- [15] 吕贻忠,李保国. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [16] 高丽丽,刘世全,张世熔. 西藏土壤钾素状况及其影响因素分析[J]. 四川农业大学学报,2004,22(2):165-169.
- [17] 汪建飞,王侠方. 水稻土耕层速效钾含量的影响因素分析[J]. 安徽农学通报,1997,3(3):25-26.
- [18] 丛日环,李小坤,鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. 华中农业大学学报,2008,26(6):907-913.
- [19] 刘菊秀,余清发,褚国伟,等. 鼎湖山主要森林类型土壤 pH 值动态变化[J]. 土壤与环境,2001,10(1):39-41.
- [21] 苏永中,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性[J]. 植物生态学报,2004,28(1):93-100.