

引用格式:唐永发,熊东红,张宝军,刘琳. 雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程对沙地持水性能的改良效应[J]. 山地学报,2021,39(4): 461-472.

TANG Yongfa, XIONG Donghong, ZHANG Baojun, LIU Lin. Study on the water holding capacity of aeolian sandy land impacted by different typical vegetation ecological projects in the middle part of Yarlung Zangbo River Valley, Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(4):461-472.

## 雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程 对沙地持水性能的改良效应

唐永发<sup>1,2</sup>,熊东红<sup>1\*</sup>,张宝军<sup>1</sup>,刘琳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室,成都 610041;

2. 四川农业大学 水利水电学院,四川 雅安 625014)

**摘 要:**雅鲁藏布江河谷中段是西藏自治区社会经济文化政治的中心区域,严重风沙灾害对雅江中段区域经济发展构成了直接威胁。雅江河谷实施的一系列防沙治沙生态工程对减轻河谷地区的风沙灾害起到了显著作用。然而,对高寒地区生态工程实施引起的沙地土壤持水性能改良效应仍然缺乏定量认知。本研究选择雅江河谷 4 种典型植被类型(藏沙蒿、花棒、砂生槐、杨树+砂生槐)生态工程样地及 1 个活跃沙丘对照样地,开展原位观测与试验研究,测定了 0~30 cm 深度土壤基本理化性质和持水性能,分析了土壤持水性能与理化性质的相关性。研究结果表明,4 种生态工程对沙地土壤理化性质及持水性能均有一定改良作用:(1)与活跃沙丘相比,生态工程实施驱动表层 0~10 cm 土壤颗粒明显细化,粉粒、极细砂含量提高 25.75~54.61 倍和 2.31~5.56 倍,中砂、粗砂含量降低 55.47%~91.57% 和 39.73%~90.23%;容重显著降低 8.67%~34.00%,总孔隙度、毛管孔隙度提高 16.06%~45.46% 和 8.74%~23.39%;有机质、全氮含量增加 17.77~72 倍和 9.50~32 倍;而 10~30 cm 土层的上述理化性质仅在杨树+砂生槐样地有显著变化。(2)生态工程实施驱动沙地表层 0~10 cm 持水性能显著提升,与活跃沙丘相比,表层土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别提高了 28.04%~124.45%、20.09%~88.75% 和 25.56%~104.80%;而 10~30 cm 土层持水能力仅杨树+砂生槐样地有显著提升。(3)相关分析表明,持水性能指标与容重、中砂粒含量极显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、粉粒、极细砂、有机质、全氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。本研究结果可为雅江河谷防沙治沙生态安全屏障建设成效评估提供基础数据支撑,同时为区域沙地治理工程类型选择提供依据和参考。

**关键词:**土地沙化;生态工程;理化性质;持水;雅鲁藏布江

**中图分类号:** S152.7

**文献标志码:** A

土地沙化是我国最严重的生态环境问题之一<sup>[1]</sup>,会造成土地可利用面积缩小和质量退化以及沙尘暴等极端天气,制约了区域社会经济的可持续发展。雅鲁藏布江(简称雅江)流域是中国河谷风

沙地貌最发育的地区之一。由于地表沙物质丰富、土壤结构破碎、气候干冷多风、植被稀疏低矮等因素<sup>[2]</sup>,雅江中游流域是青藏高原风沙地貌发育比较严重的地区。西藏自治区(简称西藏)首府拉萨市,

收稿日期(Received date):2021-01-02; 改回日期(Accepted date):2021-05-26

基金项目(Foundation item):第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0404);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20020401)。

[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0404); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA20020401)]

作者简介(Biography):唐永发(1996-),男,贵州兴义人,硕士研究生,主要研究方向:土壤水文过程。[TANG Yongfa (1996-), male, born in Xingyi, Guizhou province, M. Sc. candidate, research on soil hydrological processes] E-mail: tangyongfa@stu.sicau.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author):熊东红(1974-),男,博士,研究员,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持、山地地理研究。[XIONG Donghong (1974-), male, Ph. D., professor, research on soil erosion, soil and water conservation, and mountain geography] E-mail: dhxiong@imde.ac.cn

世界青稞之乡日喀则市和藏文化发源地山南市均位于雅江中游,沿江自然条件相对较好,开发历史早,人口密度高,经济较为发达,是西藏重要农产区及商品粮、油生产基地,也是西藏社会经济文化政治的中心。但是,严重风沙灾害不仅给当地人民群众生产、生活造成巨大负面影响,而且也对本区域经济发展构成了直接威胁<sup>[3]</sup>。近 30 年来,中央及西藏各级政府在雅江河谷实施了一系列防沙治沙生态工程<sup>[4]</sup>,对减轻河谷地区的风沙灾害起到了显著的作用。2016 年国务院发布的《西藏生态安全屏障保护与建设(2008—2030 年)》一期(2008—2015 年)工程成效评估表明,自 2008 年防沙治沙工程开始实施以来,区域土地沙化面积逐渐减少、植被种类和覆盖度明显提高,生态环境质量明显改善<sup>[5]</sup>。

植被生态工程是防沙治沙生态工程的重要举措,是促进沙地恢复最有效的方式之一。土壤水分是影响植被生长的关键限制因素<sup>[6-7]</sup>,土壤持水性能高低决定了植被自然演替过程中水分来源的多寡,与土壤质地<sup>[8-9]</sup>、结构<sup>[10]</sup>、养分<sup>[11]</sup>含量等指标密切相关。近年来,对于西北干旱区及内蒙古沙漠化等区域沙地植被恢复对土壤持水性能的影响已有大量研究<sup>[12-14]</sup>,然而,关于雅江河谷防沙治沙生态工程实施引起的土壤持水性能变化研究则鲜有报道。正确认识高寒地区生态工程实施对沙地土壤持水性能的改良效应,有利于地方政府开展沙地综合治理、环境保护等方面的工作。

本研究通过对雅江河谷 4 种典型植被类型(藏沙蒿、花棒、砂生槐、杨树+砂生槐)防沙治沙生态工程沙地土壤开展了持水性能研究,并选择一处活跃沙丘作为对照,对比分析不同植被类型生态工程实施对沙地土壤理化性质及持水性能的改良效应,分析土壤质地、结构、养分等指标与沙地土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量的相关性。研究成果为雅江河谷防沙治沙生态安全屏障建设成效评估提供基础数据支撑,为区域沙地治理工程类型选择提供依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区雅鲁藏布江中游山南宽谷北岸(29°18'18"N~29°19'04"N,91°21'17"E~91°

32'44"E),属高原温带季风半干旱气候,冬春季干燥多风且持续时间长。年平均降雨量为 300~450 mm,年内降雨分布不均,主要集中于 6—9 月,占全年降雨量的 90% 以上;干旱季从 10 月至次年 5 月,长达 7~8 个月,蒸发量达 2688.5 mm<sup>[15]</sup>。山南宽谷每年泥沙沉积量超 78 万 t<sup>[16]</sup>,大量江心洲、河漫滩在枯水期出露。与此同时,枯水期恰逢冷性高压控制的西风带急流与山谷风环流叠加作用,强劲的风力将泥沙吹向两岸广阔的河谷阶地,造成土地严重沙化,区内沙化面积达 523.1 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>,沿河谷两岸呈斑块状、片状不连续分布。研究区土壤类型为风沙土和新积土,成土时间短,无稳定结构,水分入渗快、蒸发强烈,土壤保水保肥能力差。植被类型为山地灌丛草原<sup>[18]</sup>,主要草本有藏沙蒿(*Artemisia wellbyi* Hemsl.)、白草(*Pennisetum flaccidum* Grisebach)、固沙草(*Orinus thoroldii* (Stapf ex Hemsl.) Bor)等;主要灌木有砂生槐(*Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker)、花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)等;人工林有榆树(*Ulmus pumila* L.)、银白杨(*Populus alba* L.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)等。

### 1.2 样地选择

2020 年 7 月,经过多次实地调查,在雅江河谷山南段全国防沙治沙综合示范区及其周围,选取了 4 种实施年限相近(10 年左右)的不同植被类型防沙治沙生态工程样地,分别是藏沙蒿(ZSH)、花棒(HB)、砂生槐(SSH)、杨树+砂生槐(YS+SSH)样地。各生态工程样地面积 300~600 m<sup>2</sup>,实施前均为裸露活跃沙丘。其中,藏沙蒿为典型乡土草本类型,花棒为当地引进灌木类型,砂生槐为典型乡土灌木类型,杨树+砂生槐为典型人工林配以乡土灌木类型。藏沙蒿、花棒、砂生槐等草本和灌木采用人工点播方式种植,杨树乔木采用移栽方式(行距×株距为 3 m×2 m)。此外,选择了一个裸露活跃沙丘作为对照样地(CK)。各样地在选择时充分考虑地形地貌(均位于河谷北岸阶地、围栏保护区内)、海拔(3563~3611 m)、土壤类型(均为风沙土)、抚育措施(均以自然恢复为主)等条件一致,避免这些因素对实验结果造成影响。在各样地中随机选择 3 个样方(杨树+砂生槐整个样地、灌木 2 m×2 m、草本 1 m×1 m)分别进行植被盖度、平均高度、基(胸)径等基本特性调查,并记录各样地经纬度、海拔信息。各样地基本情况如表 1 所示。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of experimental sample sites

样地	年限/a	经纬度	海拔/m	植被类型	植被盖度/%	高度/m	基(胸)径/mm	主要物种
CK	0	29°18'26"N;91°32'41"E	3565					
ZSH	10	29°18'18"N;91°32'44"E	3563	草本	45.6	0.41	6.96	藏沙蒿、固沙草
HB	10	29°18'18"N;91°32'44"E	3563	灌木	58.3	0.95	7.43	花棒、藏沙蒿
SSH	12	29°18'20"N;91°32'16"E	3565	灌木	56.0	0.84	11.78	砂生槐、藏沙蒿
YS + SSH	10	29°19'04"N;91°21'17"E	3611	乔灌	75.6	SSH:1.14 YS:5.64	SSH:11.16 YS:69.26	银白杨、砂生槐、早熟禾

1.3 采样与分析

在选定的样方中挖取 1 个深 30 cm 的土壤剖面,按照 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 分土层取样。用容积为 100 cm<sup>3</sup> 的环刀在每层采集 3 个原状土样品,共 45 个样品;同时,在每层采集混合土样约 500 g。将采集所有样品封装后带回实验室,进行土壤理化性质与持水性能测定,具体参照《土壤农化分析》<sup>[19]</sup> 方法。其中,容重、孔隙度采用环刀法测定;土壤机械组成采用马尔文激光粒度仪法测定,并采用美国制<sup>[20]</sup> 对土壤机械组成进行分类:粘粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)、极细砂 (0.05 ~ 0.1 mm)、细砂 (0.1 ~ 0.25 mm)、中砂 (0.25 ~ 0.5 mm)、粗砂 (0.5 ~ 2 mm);土壤有机质采用重铬酸钾外加热氧化法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用 HClO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮钼锑抗比色法测定;土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量采用浸泡法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件进行数据整理及统计分析。采用单因素方差分析 (One - Way ANOVA) 和 Duncan 法进行不同处理间各土壤理化性质及持水性能指标差异显著性检验,运用 Pearson 相关性系数检验土壤持水性能指标与各理化性质的相关性。使用 Origin Pro 2015 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质变化

2.1.1 土壤质地

4 种不同植被类型防沙治沙生态工程实施后,沙地表层 0 ~ 10 cm 土壤质地呈显著细化趋势 ( $P <$

0.05,表 2)。与活跃沙丘样地相比,生态工程实施后,沙地表层 0 ~ 10 cm 粉粒、极细砂含量显著提高了 25.75 ~ 54.61 倍、2.31 ~ 5.56 倍,中砂、粗砂含量显著降低了 55.47% ~ 91.57%、39.73% ~ 90.23%。其中,粉粒含量由大到小依次为砂生槐、杨树 + 砂生槐、藏沙蒿、花棒,极细砂含量由大到小依次为杨树 + 砂生槐、砂生槐、藏沙蒿、花棒;中砂、粗砂由大到小则依次为藏沙蒿、花棒、砂生槐、杨树 + 砂生槐。在 10 ~ 30 cm 土层,除藏沙蒿样地外,其他 3 种样地土壤颗粒也呈显著细化趋势。相较活跃沙丘样地,花棒、砂生槐、杨树 + 砂生槐样地 10 ~ 30 cm 土层粉粒和极细砂含量也显著增加,中砂含量显著降低。以上结果表明,雅江河谷防沙治沙生态工程实施可以有效改良土壤质地,特别是驱动表层颗粒明显细化。整体而言,杨树 + 砂生槐乔灌工程类型对土壤质地的改良效果最好,其次为花棒、砂生槐 2 种灌木工程类型,最后为藏沙蒿草本工程类型。

2.1.2 土壤容重与孔隙度

4 种不同植被类型防沙治沙生态工程实施后,沙地表层 0 ~ 10 cm 土壤容重显著降低,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度显著提高 ( $P < 0.05$ ,表 3)。在 0 ~ 10 cm 土层,4 种生态工程样地容重变化范围为 0.99 ~ 1.37 g · cm<sup>-3</sup>,与活跃沙丘样地 (1.50 g · cm<sup>-3</sup>) 相比,显著降低了 8.67% ~ 34.00%,以杨树 + 砂生槐样地降低幅度最大,其次为砂生槐、藏沙蒿和花棒样地。同时,4 种生态工程样地表层 0 ~ 10 cm 土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度相比活跃沙丘样地分别提高了 16.06% ~ 45.46%、8.74% ~ 23.39% 和 85.92% ~ 420.66%,由大到小依次为杨树 + 砂生槐、砂生槐、花棒、藏沙蒿。在 10 ~ 30 cm 土层,藏沙蒿、花棒、砂生槐样地容重、孔

表 2 不同样地土壤机械组成  
Tab.2 Soil mechanical composition for different sample sites

样地	深度/cm	土壤机械组成含量/%					
		粘粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂
CK	0 ~ 10	0.00 ± 0.00b	0.41 ± 0.06c	5.67 ± 0.93d	40.33 ± 1.23b	44.58 ± 1.54a	9.01 ± 0.68a
ZSH		0.02 ± 0.01b	12.72 ± 0.57b	19.53 ± 1.70c	42.45 ± 2.87b	19.85 ± 2.91b	5.43 ± 0.58b
HB		0.00 ± 0.00b	10.97 ± 1.72b	18.78 ± 2.39c	49.62 ± 2.86a	18.33 ± 2.01b	2.30 ± 0.78c
SSH		0.02 ± 0.00b	23.13 ± 2.07a	28.68 ± 1.84b	33.64 ± 2.65c	12.36 ± 1.46c	2.17 ± 0.67c
YS + SSH		0.15 ± 0.06a	22.80 ± 1.63a	37.19 ± 0.67a	35.22 ± 0.76c	3.76 ± 0.44d	0.88 ± 0.12d
CK	10 ~ 20	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00e	3.85 ± 0.59c	55.60 ± 2.95a	38.56 ± 2.60b	1.99 ± 0.93c
ZSH		0.08 ± 0.06ab	3.75 ± 0.15d	2.33 ± 0.03c	42.34 ± 0.04c	42.80 ± 0.33a	8.69 ± 0.47a
HB		0.07 ± 0.04ab	5.36 ± 0.10c	17.20 ± 0.99b	55.08 ± 2.13a	19.85 ± 2.14c	2.45 ± 0.84c
SSH		0.05 ± 0.06ab	7.80 ± 1.20b	19.86 ± 3.06b	47.20 ± 3.25b	20.07 ± 3.49c	5.02 ± 1.17b
YS + SSH		0.30 ± 0.27a	25.38 ± 1.46a	38.11 ± 0.83a	33.97 ± 0.65d	1.99 ± 0.59d	0.24 ± 0.21d
CK	20 ~ 30	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00d	0.40 ± 0.28d	48.16 ± 3.66b	48.29 ± 2.98a	3.15 ± 0.96bc
ZSH		0.00 ± 0.00b	1.47 ± 1.47d	0.24 ± 0.13d	25.32 ± 2.46d	52.13 ± 1.81a	20.84 ± 2.25a
HB		0.10 ± 0.00b	5.58 ± 0.21c	18.88 ± 3.77c	56.81 ± 2.70a	17.57 ± 5.19b	1.06 ± 1.05cd
SSH		0.05 ± 0.05b	8.17 ± 0.18b	22.79 ± 0.08b	46.80 ± 4.49b	17.25 ± 2.89b	4.95 ± 1.91b
YS + SSH		0.35 ± 0.25a	27.24 ± 2.05a	37.39 ± 1.49a	32.26 ± 1.65c	2.49 ± 1.05c	0.28 ± 0.25d

注:表中数据为平均值 ± 标准差。同一土层同列中不同小写字母表示组间在 0.05 的概率水平上有显著差异,下同。

表 3 不同样地土壤容重和孔隙度状况  
Tab.3 Soil bulk density and porosity for different sample sites

类型	深度/cm	容重/(g · cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
CK	0 ~ 10	1.50 ± 0.05a	38.41 ± 1.20d	36.29 ± 1.42c	2.13 ± 0.99c
ZSH		1.36 ± 0.05b	44.58 ± 2.91c	39.46 ± 2.46b	5.12 ± 1.31b
HB		1.37 ± 0.04b	45.03 ± 4.03c	41.07 ± 3.69b	3.96 ± 0.75bc
SSH		1.26 ± 0.06c	49.24 ± 1.81b	43.25 ± 1.34ab	5.99 ± 1.08b
YS + SSH		0.99 ± 0.13d	55.87 ± 2.72a	44.78 ± 3.28a	11.09 ± 4.43a
CK	10 ~ 20	1.42 ± 0.04b	40.24 ± 1.18b	36.64 ± 2.56b	3.61 ± 1.59a
ZSH		1.47 ± 0.04a	36.33 ± 1.89c	32.28 ± 2.52c	4.05 ± 1.00a
HB		1.49 ± 0.09a	37.23 ± 2.52c	34.74 ± 1.98bc	2.49 ± 0.58a
SSH		1.51 ± 0.04a	37.99 ± 1.69bc	34.78 ± 1.58bc	3.21 ± 0.76a
YS + SSH		1.24 ± 0.03c	50.37 ± 1.94a	47.60 ± 1.30a	2.77 ± 0.95a
CK	20 ~ 30	1.41 ± 0.04a	40.42 ± 1.20bc	36.42 ± 2.93b	4.00 ± 2.15a
ZSH		1.43 ± 0.19a	37.11 ± 0.35c	34.52 ± 0.29b	2.59 ± 0.60a
HB		1.43 ± 0.11a	41.77 ± 4.90b	37.32 ± 5.12b	4.45 ± 0.31a
SSH		1.47 ± 0.05a	37.48 ± 1.77c	34.88 ± 1.27b	2.60 ± 0.52a
YS + SSH		1.26 ± 0.02b	49.59 ± 1.74a	47.28 ± 2.19a	2.31 ± 0.46a

隙度与活跃沙丘样地相比整体无显著差异;但杨树+砂生槐样地容重显著低于活跃沙丘样地,总孔隙度、毛管孔隙度显著高于活跃沙丘样地。以上结果表明,藏沙蒿、花棒、砂生槐3种植被类型生态工程仅对沙地表层土壤容重、孔隙度有显著影响,而杨树+砂生槐样地由于具有稳定丰富的群落结构,对30 cm深度土层容重、孔隙度均有显著影响。这一结果也说明,杨树+砂生槐乔灌工程类型实施对沙地土壤结构的改良效果,较单一的草本(藏沙蒿)或灌木(花棒、砂生槐)工程类型会更好。

2.1.3 土壤养分

4种不同植被类型防沙治沙生态工程实施后,沙地0~30 cm土层土壤有机质、全氮含量较活跃沙丘样地均明显增加,全磷含量变化不明显( $P<0.05$ ,表4)。活跃沙丘样地在0~30 cm土层内土壤有机质、全氮含量均极低,范围分别为0~0.13 g·kg<sup>-1</sup>和0.02~0.07 g·kg<sup>-1</sup>。生态工程样地0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层土壤有机质含量分别提高到2.44~9.49 g·kg<sup>-1</sup>、0.41~5.71 g·kg<sup>-1</sup>和0.32~5.25 g·kg<sup>-1</sup>,土壤全氮含量分别提高到0.21~0.66 g·kg<sup>-1</sup>、0.08~0.41 g·kg<sup>-1</sup>和0.05~0.43 g·kg<sup>-1</sup>。其中,藏沙蒿、花棒、砂生槐样地土壤有机质、全氮含量较活跃

沙丘样地在0~10 cm土层增加最为显著;杨树+砂生槐样地在0~30 cm土层土壤有机质、全氮含量较活跃沙丘样地均增加显著。整体来看,砂生槐和杨树+砂生槐样地不同土层土壤有机质、全氮含量均显著高于藏沙蒿和花棒样地,这主要是由于砂生槐属于豆科类植物,具有明显的固氮作用。以上结果也表明,乡土灌木砂生槐生长对雅江河谷沙地土壤养分提升效果最为显著。

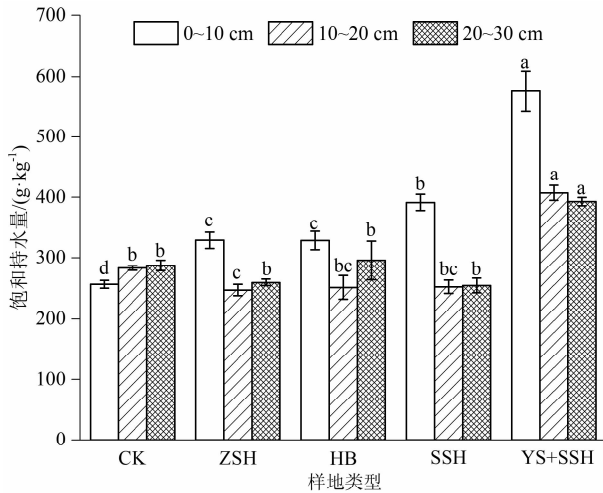
2.2 土壤持水性能变化

2.2.1 土壤饱和持水量

土壤饱和持水量是土壤所能含蓄水量的最大值,是衡量土壤涵养水源功能的重要指标之一。与活跃沙丘样地相比,4种不同植被类型防沙治沙生态工程实施均促进沙地0~10 cm土层土壤饱和持水量显著提高,10~30 cm土层仅杨树+砂生槐样地有明显提高( $P<0.05$ ,图1)。在0~10 cm土层,4种生态工程样地土壤饱和持水量大小排序依次为杨树+砂生槐(575.37 g·kg<sup>-1</sup>)、砂生槐(391.32 g·kg<sup>-1</sup>)、藏沙蒿(328.76 g·kg<sup>-1</sup>)、花棒(328.22 g·kg<sup>-1</sup>),相比活跃沙丘样地(256.35 g·kg<sup>-1</sup>),分别提高了124.45%、52.65%、28.25%和28.04%。在10~20 cm和20~30 cm土层,杨树+砂生槐样地土壤饱和持水量相比活跃沙丘样地分别提高了43.89%和

表4 不同样地土壤养分状况  
Tab.4 Soil nutrient conditions for different sample sites

类型	深度/cm	土壤养分含量/(g·kg <sup>-1</sup> )		
		有机质	全氮	全磷
CK	0~10	0.13±0.05b	0.02±0.02c	0.61±0.16a
ZSH		2.74±0.79b	0.28±0.05b	0.55±0.08a
HB		2.44±0.49b	0.21±0.04bc	0.58±0.04a
SSH		9.49±2.90a	0.65±0.21a	0.52±0.01a
YS+SSH		8.46±4.17a	0.66±0.26a	0.68±0.06a
CK	10~20	0.00±0.00b	0.07±0.05b	0.70±0.00a
ZSH		0.41±0.15b	0.08±0.02b	0.31±0.27b
HB		0.60±0.31b	0.08±0.04b	0.60±0.07a
SSH		1.11±0.15b	0.12±0.04b	0.59±0.06a
YS+SSH		5.71±1.86a	0.41±0.13a	0.51±0.07ab
CK	20~30	0.00±0.00c	0.05±0.06c	0.80±0.20a
ZSH		0.32±0.08c	0.05±0.05c	0.42±0.02b
HB		0.36±0.11c	0.10±0.04bc	0.41±0.13b
SSH		1.03±0.25b	0.13±0.02b	0.57±0.12ab
YS+SSH		5.25±0.93a	0.43±0.03a	0.62±0.09ab



注:同一土层不同小写字母表示组间在 0.05 的概率水平上有显著差异。

图 1 不同样地土壤饱和持水量差异

Fig. 1 Variations in soil saturated water capacity for different sample sites

36.80%,但藏沙蒿、花棒、砂生槐生态工程样地土壤饱和持水量较活跃沙丘样地变化不显著。

### 2.2.2 土壤毛管持水量

毛管持水量是土壤所能够保持的最大毛管上升水量,介于饱和持水量与田间持水量之间。从图 2 可以看出,4 种不同植被类型防沙治沙生态工程实施后,沙地 0~10 cm 土层土壤毛管持水量较活跃沙丘样地均显著提高( $P < 0.05$ )。在 0~10 cm 土层,生态工程样地土壤毛管持水量变化范围为 290.95~457.31  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相比活跃沙丘样地(242.28  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

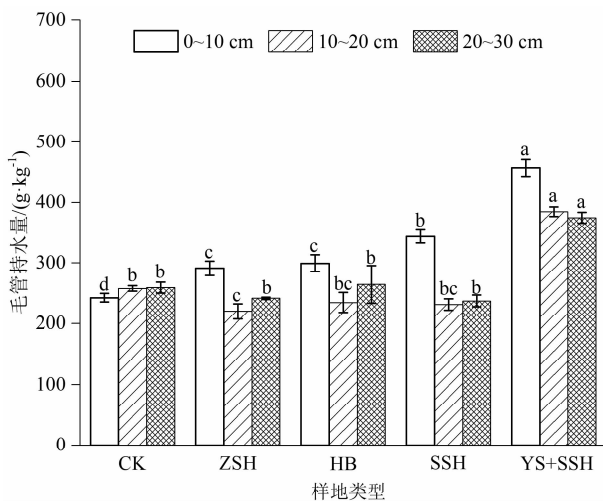


图 2 不同样地土壤毛管持水量差异

Fig. 2 Variations in soil capillary capacity for different sample sites

显著提高了 20.09%~88.75%,以杨树+砂生槐样地最高,其次为砂生槐、花棒和藏沙蒿。在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层,杨树+砂生槐样地土壤毛管持水量较活跃沙丘样地显著提高了 49.30% 和 44.77%,但其他 3 种生态工程样地变化不显著(图 2)。

### 2.2.3 土壤田间持水量

田间持水量是指土壤所能保持的最大毛管悬着水量,被认为是土壤所能稳定保持的最高土壤含水量,是土壤最大有效水量,常被作为灌溉定额指标。4 种不同植被类型防沙治沙生态工程实施后,沙地 0~10 cm 土层土壤田间持水量较活跃沙丘样地均显著提高( $P < 0.05$ ,图 3)。在 0~10 cm 土层,生态工程样地土壤田间持水量变化范围为 262.33~427.87  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相比活跃沙丘样地(208.92  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著提高了 25.56%~104.80%,由大到小排序依次为杨树+砂生槐、砂生槐、花棒、藏沙蒿。在 10~30 cm 土层,杨树+砂生槐样地土壤田间持水量较活跃沙丘样地也显著提高,其他 3 种生态工程样地均无显著变化。在 10~20 cm 土层,与活跃沙丘样地(218.53  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )相比,杨树+砂生槐样地土壤田间持水量(364.42  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著提高了 66.76%;在 20~30 cm 土层,相较于活跃沙丘样地(219.78  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),杨树+砂生槐样地土壤田间持水量(362.37  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著提高了 64.88%。

### 2.3 土壤持水性能与土壤理化性质的相关分析

土壤持水性能指标与土壤理化性质相关分析结果见表 5。可以看出,雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程实施后,土壤饱和持水量、毛管持水量和田

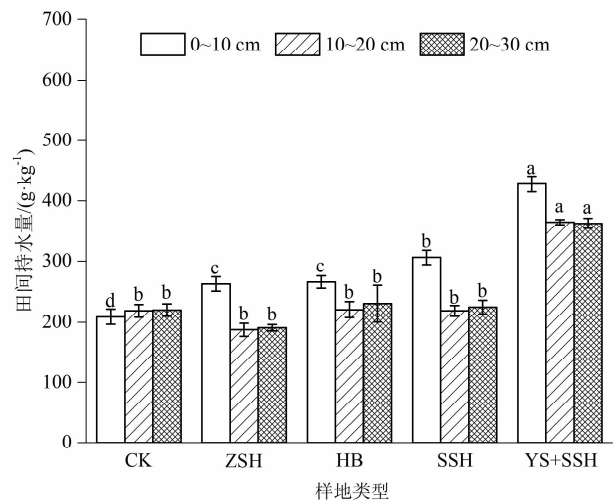


图 3 不同样地土壤田间持水量差异

Fig. 3 Variations in soil field capacity for different sample sites

表 5 土壤持水性能与理化性质的相关性分析

Tab. 5 Correlation coefficient between soil water holding capacity and physicochemical properties

指标	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	黏粒含量	粉粒含量	极细砂含量
饱和持水量	-0.897 **	0.948 **	0.851 **	0.653 **	0.005	0.793 **	0.701 **
毛管持水量	-0.962 **	0.839 **	0.928 **	0.393	0.079	0.868 **	0.802 **
田间持水量	-0.940 **	0.723 **	0.899 **	0.221	0.138	0.891 **	0.874 **

指标	细砂含量	中砂含量	粗砂含量	有机质含量	全氮含量	全磷含量
饱和持水量	-0.473	-0.653 **	-0.484	0.969 **	0.969 **	0.156
毛管持水量	-0.503	-0.747 **	-0.553 *	0.932 **	0.944 **	0.216
田间持水量	-0.443	-0.830 **	-0.628 *	0.874 **	0.897 **	0.255

注：\* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；\*\* 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

间持水量变化,与土壤容重、中砂粒含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、粉粒、极细砂、有机质、全氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。以上结果表明,防沙治沙生态工程实施后沙地持水性能的提升,与土壤质地细化、土壤结构改善和土壤养分含量增加等密切相关。

3 讨论

3.1 生态工程实施土壤理化性质变化

雅江河谷防沙治沙生态工程实施后,沙地 0 ~ 30 cm 土层粉粒、极细砂含量明显提高,中砂粒含量逐渐降低,其中表层 0 ~ 10 cm 土壤质地细化趋势最为显著(表 2),该结果与李尝君等<sup>[21]</sup>在塔克拉玛干沙漠对植被恢复后沙地物理性质变化的研究结果相似。一方面,这是由于植被生长过程中,枯落物混入土壤中分解成有机质以及根系分泌物产生的生物作用促进土壤颗粒分解;另一方面,也有研究认为沙地土壤颗粒细化与植被覆盖减弱风蚀及捕尘滞尘有关<sup>[22]</sup>,近地层空气中约 30% ~ 60% 的降尘被植被枝叶拦截后输入地表<sup>[23]</sup>,受降雨淋溶的作用逐渐向下层土壤沉降,增加了地表小颗粒物含量,但这种变化是一个长期过程<sup>[24]</sup>。整体而言,杨树 + 砂生槐乔灌工程类型对土壤质地的改良效果最好,其次为花棒、砂生槐 2 种灌木工程类型,最后为藏沙蒿草本工程类型。这可能是由于生态工程植被类型差异导致群落组成、茎秆覆盖、根系生长、枯落物蓄积等产生差异,进而对土壤质地变化造成显著影响<sup>[24]</sup>,这与吴永胜等<sup>[25]</sup>对毛乌素沙地 3 种人工固沙林机械组

成研究结果类似,他们的结果表明乔木(沙地柏)类型对沙地机械组成改良效果好于灌木(杨柴、紫穗槐)。

防沙治沙生态工程实施导致沙地表层 0 ~ 10 cm 土壤容重显著降低、孔隙度显著增加,杨树 + 砂生槐工程类型对 10 ~ 30 cm 土层土壤容重和孔隙度影响也比较显著(表 3)。该结果与曹成有等<sup>[26]</sup>在科尔沁沙漠对小叶锦鸡儿固沙地理化性质的研究结果相似,他们的研究发现小叶锦鸡儿样地表层土壤容重显著低于流沙对照,孔隙度显著高于流沙对照。一方面,生态工程实施后沙地细颗粒含量提高,粘粒、粉粒的粘结作用可促进土壤形成稳定孔隙结构,促进容重降低、孔隙度提高;另一方面,植被根系生长和枯落物混入土壤,也能促进土壤容重和孔隙度发生变化<sup>[27]</sup>。

防沙治沙生态工程实施显著提高沙地土壤有机质、全氮含量(表 4)。这是因为生态工程实施后风蚀作用减弱、风积作用加强,生物结皮发育、枯落物蓄积、根系作用均促进了养分积累<sup>[28]</sup>。生物结皮层显著提高微生物数量,从而影响土壤养分周转,促进有机质、全氮积累;枯落物混入土壤分解可加快养分循环过程,同时枯落物的输入和腐殖化能提高土壤有机质分解速率,进而促进养分含量提高<sup>[26]</sup>;根系是发生物质同化、转化、合成等重要生理过程场所,根系分泌化合物参与土壤养分循环调控,也有效促进有机质、全氮积累<sup>[29]</sup>。砂生槐和杨树 + 砂生槐工程样地不同土层土壤有机质、全氮含量均显著高于藏沙蒿和花棒样地。这主要是由于砂生槐属于豆科类植物,固氮作用强<sup>[30]</sup>,有效提高土壤全氮含量。

此外,对于杨树+砂生槐样地,林下伴生大量一年生早熟禾等草本植物,丰富的枯落物蓄积及发达的草本根系生长,也有助于不同土层土壤有机质和全氮含量的增加。

综上所述,雅江河谷不同防沙治沙生态工程实施 10 年左右,均引起了沙地表层 0~10 cm 土壤质地、结构和养分状况的显著改善,杨树+砂生槐乔灌工程类型,由于具有更稳定的群落结构,甚至对 10~30 cm 土层土壤质地、结构和养分也具有明显的改良效果。

### 3.2 生态工程实施持水性能变化

土壤持水性能是表征生态系统水源涵养功能的重要指标,是制约植被是否能够长期稳定生长的关键限制因素。本研究中,雅江河谷中段防沙治沙生态工程实施后,沙地表层 0~10 cm 饱和持水量均显著高于活跃沙丘样地,提高了 28.04%~124.45%,其持水能力由大到小依次为乔灌(杨树+砂生槐)、灌木(砂生槐、花棒)、草本(藏沙蒿)、活跃沙丘(图 1),该结果与韩路等<sup>[31]</sup>在塔里木干旱荒漠区研究结果相似,他们的研究结果发现饱和持水量由大到小依次为乔木、灌木、草本、裸地。此外,本研究中,生态工程样地表层 0~10 cm 土壤毛管持水量和田间持水量相比活跃沙丘样地分别提高了 20.09%~88.75% 和 25.56%~104.80% (图 2,图 3),该结果与蔡楚雄等<sup>[32]</sup>对科尔沁沙地不同植被类型理化性质的研究结果相似,有植被措施的样地毛管持水量、田间持水量均显著高于裸沙地,不同植被样地毛管持水量、田间持水量大小依次为乔木(樟子松)、灌木(柠条)、草本(狗尾草),这与本研究结果乔灌、灌木、草本一致。植被生长过程中,枯落物分解混入土壤中改变土壤环境,以及根系生长产生的化学作用促进土壤中形成稳定结构,增加了毛管孔隙度,进而促进土壤毛管持水量和田间持水量提高。

沙地持水性能与土壤容重、孔隙度、质地等反映土壤结构的指标密切相关<sup>[33]</sup>,同时也受养分含量的影响<sup>[34]</sup>。相关性分析表明,土壤持水性能与容重、中砂粒含量显著负相关;与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、粉粒、极细砂、有机质、全氮含量呈极显著正相关(表 5)。这是由于土壤容重越小,质地越疏松,土壤中孔隙度含量则越多,为水分贮存提供了空间;土壤中的细小颗粒及养分能够起到改善土壤结构的作用,提高土壤土水势,促进土壤持水能力提高。该结

果与朱万泽等<sup>[35]</sup>在川西亚高山的研究结果相似,他们的研究也发现土壤持水量与容重显著负相关,与孔隙度含量显著正相关。谭学进等<sup>[36]</sup>在黄土高原研究发现,持水性能指标与砂粒呈负相关,与粉粒、粘粒呈正相关;与本研究结果不同,这可能是由于立地条件差异导致土壤机械组成不同造成。

综上,不同植被类型生态工程对沙地持水性能的改良效果不同,杨树+砂生槐由于植被群落结构更丰富,不仅能驱动深层土壤持水量提高,从提升的程度上也显著高于其他植被类型生态工程。

### 4 结论

(1)相比活跃沙丘样地,4 种典型植被类型防沙治沙生态工程实施后,表层 0~10 cm 土壤粉粒、极细砂含量显著提高了 25.75~54.61 倍、2.31~5.56 倍,中砂、粗砂含量显著降低了 55.47%~91.57%、39.73%~90.23%;土壤容重显著降低了 8.67%~34.00%;土壤有机质、全氮含量增加了 17.77~72 倍和 9.50~32 倍。在 10~30 cm 土层,杨树+砂生槐样地土壤粉粒、极细砂、有机质和全氮含量均呈增加趋势,中砂、粗砂含量和容重呈降低趋势。

(2)4 种典型植被类型防沙治沙生态工程实施后,表层 0~10 cm 土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别为 328.22~575.37 g·kg<sup>-1</sup>、290.95~457.31 g·kg<sup>-1</sup>和 262.33~427.87 g·kg<sup>-1</sup>,相比活跃沙丘样地分别提高了 28.04%~124.45%、20.09%~88.75% 和 25.56%~104.80%;在 10~30 cm 土层,杨树+砂生槐样地饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均有提升。

(3)相关分析表明,土壤持水性能指标与土壤容重、中砂粒含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、粉粒、极细砂、有机质、全氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

(4)综合来看,杨树+砂生槐模式对沙地持水性能提升最好,其次为乡土种砂生槐。建议今后在实施生态工程时优先选用该乔灌模式,对现有砂生槐补种乔木并撒播草种,构建“乔+灌+草”生态工程模式,丰富群落结构,更高效地促进沙地恢复。

### 参考文献(References)

- [1] 国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[R]. 北京: 国家林业局, 2015: 3~12. [State Forestry Administration, P. R. China. The desertification and sandification state of China [R]. Beijing:



- State Forestry Administration, P. R. China, 2015: 3–12]
- [2] 沈渭寿, 李海东, 林乃峰, 等. 雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果[J]. 生态学报, 2012, **32**(17): 5609–5618. [SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al. Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(17): 5609–5618] DOI: 10.5846/stxb201112201940
- [3] 金炯, 董光荣, 邵立业, 等. 西藏土地风沙化问题的研究[J]. 地理研究, 1994, **13**(1): 60–69. [JIN Jiong, DONG Guangrong, SHAO Liye, et al. Study on the wind-sand impacted lands in Tibet autonomous region [J]. *Geographical Research*, 1994, **13**(1): 60–69] DOI: 10.11821/yj1994010008
- [4] 钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 等. 西藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 山地学报, 2006, **24**(2): 129–136. [ZHONG Xianghao, LIU Shuzhen, WANG Xiaodan, et al. A research on the protection and construction of the state ecological safe shelter zone on the Tibet Plateau [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(2): 129–136] DOI: 10.3969/j.issn.1008–2786.2006.02.001
- [5] 王小丹, 程根伟, 赵涛, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设成效评估[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(1): 29–34. [WANG Xiaodan, CHENG Genwei, ZHAO Tao, et al. Assessment on protection and construction of ecological safety shelter for Tibet [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(1): 29–34] DOI: 10.16418/j.issn.1000–3045.2017.01.004
- [6] LI Congjuan, LEI Jiaqiang, ZHAO Ying, et al. Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway shelterbelt [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **146**(SI): 99–107. DOI: 10.1016/j.still.2014.03.013
- [7] 赵传燕, 冯兆东, 刘勇. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展[J]. 山地学报, 2003, **21**(2): 157–161. [ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, LIU Yong. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation [J]. *Mountain Research*, 2003, **21**(2): 157–161] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2003.02.004
- [8] 曹樱子, 王小丹. 藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2014, **32**(4): 438–443. [CAO Yingzi, WANG Xiaodan. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristic in the alpine steppe of the northern Tibet [J]. *Mountain Research*, 2014, **32**(4): 438–443] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2014.04.008
- [9] 崔浩浩, 张冰, 冯欣, 等. 不同土体构型土壤的持水性能[J]. 干旱地区农业研究, 2016, **34**(4): 1–5. [CUI Haohao, ZHANG Bing, FENG Xin, et al. Soil water-holding properties of different soil body configuration [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, **34**(4): 1–5] DOI: 10.7606/j.issn.1000–7601.2016.04.01
- [10] 牛赞, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山北坡土壤特性与植被垂直分布的关系[J]. 山地学报, 2013, **31**(5): 527–533. [NIU Yun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Relationship between characteristics of soil and vertical distribution of vegetation on the northern slope of Qilian Mountains [J]. *Mountain Research*, 2013, **31**(5): 527–533] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2013.05.017
- [11] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 802–806. [SU Yongzhong, ZHAO Halin, ZHANG Tonghui. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 802–806] DOI: 10.13287/j.1001–9332.2002.0190
- [12] 孙婴婴, 孙绪博, 曹婷婷, 等. 砒砂岩对毛乌素沙地风沙土储水能力影响的研究[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(6): 105–110. [SUN Yingying, SUN Xubo, CAO Tingting, et al. Study on the influence of soft rock on moisture storage capacity of sandy soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(6): 105–110] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.06.017
- [13] 李凤英, 张露, 何小武, 等. 鄱阳湖滨不同植被类型沙地土壤有效持水能力研究[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(2): 107–111. [LI Fengying, ZHANG Lu, HE Xiaowu, et al. Available water holding capacity of sandy soil in the shore of Poyang Lake [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(2): 107–111] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20181105.001
- [14] 高亮, 高永, 韩彦隆, 等. 不同治理措施下科尔沁沙地南缘土壤质地与持水特性研究[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(4): 1–6. [GAO Liang, GAO Yong, HAN Yanlong, et al. Soil structure and water retention capacity in southern Horqin sandy land under different control measures [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(4): 1–6] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.001
- [15] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势[J]. 生态学报, 2010, **30**(21): 5716–5727. [LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al. Spatial distribution and evolution of aeolian sandy land in the areas around Lhasa Airport (Tibet, China) since 1990 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(21): 5716–5727]
- [16] 李森, 王跃, 哈斯, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题[J]. 中国沙漠, 1997, **17**(4): 10–18. [LI Sen, WANG Yue, HA Si, et al. Classification and development of aeolian sand landform in the Yarlung Zangbo valley [J]. *Journal of Desert Research*, 1997, **17**(4): 10–18]
- [17] SHEN Weishou, LI Haidong, SUN Ming, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, **86/87**: 37–44. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.01.012
- [18] 李海东, 沈渭寿, 方颖, 等. 雅鲁藏布江中游河岸带几种主要沙生植物种群点格局分析[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(8):

- 834 – 843. [LI Haidong, SHEN Weishou, FANG Ying, et al. Point pattern analysis of several psammophyte populations in the riparian ecotone in the middle reaches of Yarlung Zangbo River of Tibet, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, **35** (8): 834 – 843] DOI: 10.3724/SP.J.1258.2011.00834
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14 – 49, 70 – 78. [BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd. ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14 – 49, 70 – 78]
- [20] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, **56**(1): 227 – 241. [WU Kening, ZHAO Rui. Soil texture classification and its application in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(1): 227 – 241] DOI: 10.11766/trxb201803120129
- [21] 李尝君, 曾凡江, 郭京衡, 等. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例[J]. 干旱区研究, 2015, **32** (6): 1061 – 1067. [LI Changjun, ZENG Fanjiang, GUO Jingheng, et al. Soil properties of different sandy lands under different vegetation recovering levels: A case in southern Taklimakan Desert [J]. Arid Zone Research, 2015, **32** (6): 1061 – 1067] DOI: 10.13866/j.azr.2015.06.03
- [22] 毛东雷, 雷加强, 曾凡江, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带风沙活动强度的空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 13 – 19. [MAO Donglei, LEI Jiaqiang, ZENG Fanjiang, et al. Spatial distribution characteristics of sand blown activities intensity on Cele Oasis – Desert Ecotone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(2): 13 – 19] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2013.02.011
- [23] 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J]. 中国沙漠, 1997, **17**(2): 127 – 132. [XIAO Honglang, ZHANG Jixian, LI Jingui. Dustfall particle-size and sediment rate at the southern edge of Tengger desert [J]. Journal of Desert Research, 1997, **17**(2): 127 – 132] DOI: 10.1007/BF02951625
- [24] 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[J]. 草业学报, 2015, **24**(5): 44 – 52. [XI Junqiang, YANG Zihui, GUO Shuijiang, et al. Effects of *Haloxylon ammodendron* planting on soil physico-chemical properties and soil microorganisms in sandy dunes [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, **24**(5): 44 – 52] DOI: 10.11686/cyxh20150506
- [25] 吴永胜, 郭建英, 刘静, 等. 毛乌素沙地南缘人工植被恢复对表土机械组成和养分的影响[J]. 土壤通报, 2018, **49**(3): 560 – 566. [WU Yongsheng, GUO Jianying, LIU Jing, et al. Effects of artificial vegetation restoration on mechanical composition and nutrient contents of surface soil in southern Mu Us sandy land, northern China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49** (3): 560 – 566] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.03.09
- [26] 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 – 111. [CAO Chengyou, JIANG Deming, QUAN Guijing, et al. Soil physical and chemical characters changes of *Caragana microphylla* plantation for sand fixation in Keerqin sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, **18**(6): 108 – 111] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2004.06.026
- [27] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 3807 – 3819. [LI Qiang, ZHOU Daowei, CHEN Xiaoying. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(14): 3807 – 3819] DOI: 10.5846/stxb201211271684
- [28] 孙永琦, 冯薇, 张宇清, 等. 毛乌素沙地生物土壤结皮对油蒿群落土壤酶活性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(11): 82 – 90. [SUN Yongqi, FENG Wei, ZHANG Yuqing, et al. Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities of *artemisia ordosica* community in the Mu Us Desert of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, **42**(11): 82 – 90] DOI: 10.12171/j.1000?1522.20190082
- [29] 尹瑞平, 王峰, 吴永胜, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物数量及其影响因素[J]. 中国水土保持, 2014(12): 40 – 44. [YIN Ruiping, WANG Feng, WU Yongsheng, et al. Microbial quantities of biological crusting of sand dunes in the southern edge of Mu Us Desert and its influencing factors [J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(12): 40 – 44] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2014.12.019
- [30] 李刚, 王丽娟, 李玉洁, 等. 呼伦贝尔沙地不同植被恢复模式对土壤固氮微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24** (6): 1639 – 1646. [LI Gang, WANG Lijuan, LI Yujie, et al. Effects of different vegetation restoration patterns on the diversity of soil nitrogen-fixing microbes in Hulunbeier sandy land, Inner Mongolia of north China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(6): 1639 – 1646] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.2013.0343
- [31] 韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(6): 124 – 129. [HAN Lu, WANG Haizhen, YU Jun. Soil hydrological characteristics of different vegetation types in the upper reaches of Tarim River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(6): 124 – 129] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2013.06.051
- [32] 蔡楚雄, 贾玉华, 郭成久. 科尔沁沙地南缘不同植被对土壤物理性质改良作用研究[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(2): 49 – 54. [CAI Chuxiong, JIA Yuhua, GUO Chengjiu. Research for effect of different types of vegetation on physical properties improvement of sandy soil in the sandy land in south Horqin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(2): 49 – 54] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.02.008
- [33] 苏杨, 朱健, 王平, 等. 土壤持水能力研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(14): 140 – 145. [SU Yang, ZHU Jian, WANG

- Ping, et al. Research progress on soil water holding capacity [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, **29**(14): 140–145] DOI: 10.3969/j.issn.1000–6850.2013.14.027
- [34] 孙岩, 王一博, 孙哲, 等. 有机质对青藏高原多年冻土活动层土壤持水性能的影响[J]. 中国沙漠, 2017, **37**(2): 288–295. [SUN Yan, WANG Yibo, SUN Zhe, et al. Impact of soil organic matter on water hold capacity in permafrost active layer in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2017, **37**(2): 288–295] DOI: 10.7522/j.issn.1000–694X.2016.00083
- [35] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(6): 205–212. [ZHU Wanze, SHENG Zheliang, SHU Shumiao. Soil physical properties sand water holding capacity of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(6): 205–212] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2019.06.029
- [36] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 713–722. [TAN Xuejin, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 713–722] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000–6923.2019.0088

## Water Holding Capacity of Aeolian Sandy Land Impacted by Different Typical Vegetation Ecological Projects in the Middle Reach of the Yarlung Zangbo River Valley, Tibet, China

TANG Yongfa<sup>1,2</sup>, XIONG Donghong<sup>1\*</sup>, ZHANG Baojun<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

**Abstract:** The middle reach of the Yarlung Zangbo River Valley is the central area of social, economic, cultural and political activities in the Tibet Autonomous Region, where severe wind and sand disasters pose a direct threat to its economic development. A series of ecological projects for sand prevention and control were implemented in the valley, which played a significant role in mitigating the disasters. However, there is still lack of quantitative understanding of the effect of ecological projects implementation in alpine regions on the improvement of sandy soil water holding capacity. In this study, four typical vegetation restoration types, i. e., *Artemisia wellbyi* Hemsl., *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey., *Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker, *Populus L.* + *Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker, and one bare sandy land (as control) were selected in the middle reach of the Yarlung Zangbo River Valley. The basic physicochemical properties and water holding capacities of soil at a depth of 0 ~ 30 cm were measured, and their correlational relationship was analyzed based on the in-situ observations and experimental research. The results showed that the four ecological projects have a certain effect on improving the physicochemical properties and the water-holding performance of the aeolian sandy soil. (1) Compared to the control, the implementation of ecological projects has promoted the apparent refinement of the soil particles at the layer of 0 ~ 10 cm. For the vegetation-restored sandy lands, the silt and very fine sand contents significantly increased by 25.75 ~ 54.61 times and 2.31 ~ 5.56 times, while the medium and coarse sand significantly decreased by 55.47% ~ 91.57% and 39.73% ~ 90.23%, respectively. Bulk density was significantly reduced by 8.67% ~ 34.00%, while the total porosity and capillary porosity increased by 16.06% ~ 45.46% and 8.74% ~ 23.39%, respectively. Furthermore, the contents of organic matter and total nitrogen increased 17.77 ~ 72 times and 9.50 ~ 32 times, respectively. However, the above-mentioned physicochemical properties of the 10 ~ 30 cm soil layer only

changed significantly in *Populus L. + Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker restored sandy land. (2) Vegetation restoration on the aeolian sandy lands significantly improved the water holding capacities of topsoil (0 ~ 10 cm). Compared to the control, the saturated water capacity, capillary capacity and field capacity of the topsoil (0 ~ 10 cm) significantly increased by 28.04% ~ 124.45%, 20.09% ~ 88.75% and 25.56% ~ 104.80%, respectively. In the 10 ~ 30 cm soil layer, the water holding capacities were also significantly improved in the *Populus L. + Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker restored sandy land. (3) Correlation analysis indicated that the water holding capacities were significantly negatively related to bulk density and medium sand content, and were significantly positively related to total porosity, capillary porosity, silt, very fine sand, organic matter and total nitrogen ( $P < 0.01$ ). The results of this study provide basic data support for the evaluation of the effectiveness of ecological safety shelter construction on the aeolian sandy lands, and also provide a scientific basis for the selection of the suitable vegetation types to recover the sandy landforms in the Yarlung Zangbo River Valley.

**Key words:** aeolian desertification; ecological project; physicochemical property; water holding capacity; the Yarlung Zangbo River