

不同植被类型对黄河三角洲贝壳堤 土壤水文功能的影响

魏晓明^{1,2}, 夏江宝², 孔雪华³, 任加云², 杨吉华¹

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 2. 滨州学院

山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603; 3. 潍坊科技学院, 山东 寿光 262700)

摘要:以滩涂裸地为对照,对黄河三角洲贝壳堤向海侧的盐生灌草、滩脊地带的旱生灌草及向陆侧的盐生草3种植被类型的土壤水文功能进行了研究。结果表明,与裸地相比,贝壳堤生境条件下的盐生灌草、旱生灌草及盐生草3种植被类型土壤容重降低了8.5%~20.8%,总孔隙度增加了17.1%~46.1%。滩脊地带的旱生灌草改善土壤孔隙状况效果最好,向陆侧的盐生草最差。3种植被类型具有一定的压碱抑盐效应,降盐碱功能表现为滩脊地带的旱生灌草最好,其次为向海侧的盐生灌草,而向陆侧盐生草最差。不同被覆地类土壤渗透性能力大小表现为:向陆侧盐生草<滩脊地带旱生灌草<向海侧盐生灌草<裸地。0—40 cm土层的土壤饱和贮水量和毛管贮水量表现为:滩脊地带旱生灌草>向海侧盐生灌草>向陆侧盐生草。在垂直层次上,贝壳堤不同植被类型改良盐碱、土壤孔隙状况及贮水性能均表现为0—20 cm优于20—40 cm土层。研究表明,贝壳堤滩脊地带旱生灌草植被的土壤贮蓄水分及降盐改土能力最优,其次为向海侧的盐生灌草,向陆侧的盐生草较差。

关键词:土壤物理性质; 植被类型; 土壤水文效应; 贝壳堤; 黄河三角洲

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0028-05

中图分类号: S715.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.020

Effect of Different Vegetation Types on Soil Hydrological Function at Shell Ridge in Yellow Delta

WEI Xiao-ming^{1,2}, XIA Jiang-bao², KONG Xue-hua³, REN Jia-yun², YANG Ji-hua¹

(1. Forestry College of Shandong Agriculture University, Taian, Shandong 271018, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China; 3. Weifang University of Science and Technology, Shouguang, Shandong 262700, China)

Abstract: Compared with bare land, soil hydrological characteristics of three kinds of saline bringing, xerophytic bringing and saline herbaceous were researched in shell ridge island of the Yellow River Delta. Results indicated that compared with bare land, the soil bulk density of three vegetation types decreased by 8.5%~20.8%, soil total porosity increased by 17.1%~46.1%, the effect of xerophytic bringing vegetation in beach ridge zone was the best, the effect of saline herbaceous vegetation close to landside was the worst. The sequence of the soil permeability characteristics of different vegetation types was in the following increasing order: saline herbaceous vegetation close to landside<xerophytic bringing vegetation in beach ridge zone<saline bringing vegetation close to the seaside<bare land. The sequence of the soil saturated water and capillary water of the soil layer in 0—40 cm was in the following decreasing order: xerophytic bringing vegetation in beach ridge zone>saline bringing vegetation close to the seaside>saline herbaceous vegetation close to landside. The soil water storage performance and improved effect of the soil layer in 0—20 cm were better than that in 20—40 cm. The ability of soil water savings, salt reducing and soil improving of xerophytic bringing vegetation in beach ridge zone was the best, that of saline herbaceous vegetation close to landside was the worst.

Keywords: soil physical properties; vegetation types; soil hydrological effect; shell ridge; Yellow River Delta

收稿日期:2013-07-31

修回日期:2013-08-13

资助项目:国家自然科学基金项目“贝壳堤岛3种灌木光合效率对土壤水分的阈值效应”(31100468);山东省高校科技发展计划项目(J13LC03);山东省科技发展计划项目(2013YD17001)

作者简介:魏晓明(1989—),男(汉族),山东省东营市人,硕士研究生,研究方向为林业生态工程。E-mail: weixiaomingqwe@163.com。

通信作者:夏江宝(1978—),男(汉族),山东省安丘市人,博士,副教授,主要从事植被恢复与生态重建方面的研究。E-mail: xiajb@163.com。

贝壳堤是由海生贝壳及其碎片和细砂、粉砂、泥炭、淤泥质黏土薄层组成,与海岸大致平行或交角很小的堤状地貌堆积体。黄河三角洲位于渤海西南岸,境内分布有两道贝壳堤,向北与天津、河北地区的贝壳堤相连,形成国内独有的贝壳滩脊海岸,在此基础上发育了该生境特殊的堆积型链状岛群^[1]。黄河三角洲贝壳堤在维持与稳定海岸地貌、海平面变化及气候变化等方面占有极其重要的地位。贝壳堤土壤及淡水资源缺乏,常受海风和风暴潮袭击;同时受人干扰的影响,植被呈现不同程度的退化,导致水土流失加剧。贝壳堤生境下的植被恢复与重建可起到防风固沙、保持水土的功能,对改善区域生态环境和维持生态系统稳定具有重要意义^[2-3]。随着距离海岸带远近的不同,贝壳堤植被呈现一定的地带性特征,目前对贝壳砂生境不同植被类型下的生态水文物理特性尚不明确,以致于基于土壤水文功能和蓄水保土效益为经营目的的植被模式配置受到较大限制。

土壤层是森林水文作用的第 3 个活动层,被称为大气降水的“蓄存库”和“调节器”,而土壤质地及植被类型的不同使土壤层蓄水保土能力有较大差异^[4-6]。土壤水文物理特征是森林生态系统水分循环中林分结构与功能的综合体现,常被作为评价土壤质量的重要指标^[7-8]。土壤层的贮蓄及调节水能力与土壤容重、孔隙度等基本物理指标和土层厚度密切相关^[4-5,7]。土壤水分入渗是明确地表径流调节机制及土壤侵蚀防治研究的重要指标,与土壤理化性质关系较大^[9-10]。目前对土壤蓄水功能的研究主要以山丘区的不同植被类型为主^[5-8],而对海岸带防护林的土壤改良及其保持水土功能研究较少^[11-12]。黄河三角洲贝壳堤生境不同立地类型下的植被改善土壤水文物理性质及涵养水源能力的分析尚未见报道,在一定程度上限制了贝壳堤防护林植物材料的选择及其栽植管理。为此,本研究选取距离泥质海岸带由远到近的向海侧、滩脊地带及向陆侧的三种植被类型为分析对象,对其改良

盐碱状况、土壤物理性状、渗透性能及土壤层贮蓄水分能力进行对比分析,以期对黄河三角洲贝壳堤水土保持防护林的空间布局及模式配置提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山东滨州市无棣县中东部滨海低地的汪子岛(38°14'30"N, 117°54'38"E),属于暖温带东亚季风大陆性半湿润气候区,年均降水量为 550 mm,6—9 月降雨量占全年降雨量的 71%,蒸降比为 4.4。贝壳堤海拔在 5 m 以下,地下水水位浅,矿化度高。贝壳砂平均厚度达 1.0~2.5 m,土壤类别主要是贝壳砂土类和滨海盐土类,向海侧和向陆侧以滨海盐渍土为主,成土母质由风积物和钙质贝壳土壤组成。植被类型以杠柳(*Periploca sepium*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)和柺柳(*Tamarix chinensis*)等灌木树种和二色补血草(*Limonium bicolor*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等草本植物为主。

2 研究方法

2.1 样地设置

2012 年 7 月中旬,在山东省滨州市贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区的汪子岛内,以距离海岸带远近选取 3 种典型植被类型,各植被类型基本状况详见表 1。分别为向海侧分布的以柺柳、二色补血草为主的盐生灌草植被,滩脊地带分布的以酸枣、杠柳及狗尾草为主的旱生灌草植被,向陆侧分布的以翅碱蓬为主的盐生草本植被,并以滩涂贝壳砂裸地作为对照。每种植被类型下选取 3 个 10 m×10 m 的标准地,每标准地内按 S 形均匀布设 5 个取样点,按 0—20 cm 和 20—40 cm 分层取样,风干后分层混匀进行土壤 pH 值和含盐量测定;同步挖取土壤剖面测定土壤容重与孔隙度。植被覆盖度采用网格目估法进行测定,每树种各选取 30 株进行树高和基茎的测定。

表 1 贝壳堤不同植被类型的基本状况

分布位置	植被类型	覆盖度/%	典型植被	平均树高/m	平均基茎/m	平均树龄/a
向海侧	盐生灌草	55	柺柳	1.58	1.12	5
			二色补血草			
滩脊地带	旱生灌草	60	酸枣	1.63	1.37	7
			杠柳	1.35	1.24	6
			狗尾草			
向陆侧	盐生草本植物	45	翅碱蓬			

2.2 测定方法

土壤 pH 值采用 pH 值计(水土比 5:1)测定;可

溶性盐采用重量法测定,水土比按 5:1 浸提,振荡 30 min 后静置过滤,吸取 10 ml 过滤液至称过重的蒸

发皿中,110℃下加热烘干至恒重,并加入 50% H₂O₂ 氧化残留的有机质,最后称重。双环法测定水分在土壤中的渗透速度,内、外环直径分别为 30 和 50 cm,双环高度均为 35 cm,用橡胶锤打入土壤中 20 cm,人工定量加水到水头深 10 cm,双环在试验时维持最低水深 5 cm,秒表计时,利用内环中的标尺读取在单位时间内所消耗的水量,达到稳渗时测定结束。烘干法测定土壤含水量;环刀浸水法测定土壤容重、孔隙度等,并计算土壤贮水量等各项土壤水文物理指标^[9,13]。不同植被类型土壤水文功能的综合评价采用模糊数学隶属函数法,计算公式为:

$$X_{(u)} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中: $X_{(u)}$ ——隶属函数值; X_i ——各植被类型某指标的平均值; X_{\min} , X_{\max} ——不同植被类型中某指标内的最小值和最大值。如果所测指标与质效呈负相关关系,则反隶属函数值为 $1 - X_{(u)}$ 。

3 结果与讨论

3.1 不同植被类型下的土壤容重和孔隙度

由表 2 可以看出,在土壤垂直结构上,除滩涂裸地外,滩脊地带的旱生灌草、向海侧的盐生灌草植被及向陆侧的盐生草本植被等 3 种植被类型的土壤容重均表现为 0—20 cm 低于 20—40 cm,可见贝壳堤土壤表层土质较疏松,土壤紧实度降低,即植被覆盖下表层土的土壤孔隙度较大。这与其地表有枯落物分解形成一定厚度的腐殖质层有很大关系,土壤孔隙度较大也利于改善表层土的土壤结构,促其形成团粒结构。旱生灌草植被两个土层的土壤毛管孔隙度占总孔隙度的比例分别为 81.3% 和 82.0%,而盐生灌草和盐生草本植被两个土层的比例分别为 74.2%, 73.8% 和 70.9%, 71.7%。表明贝壳堤旱生灌草植被土壤中有效水的贮存容量较大,利于树木根系对水分的有效利用,有利于形成土壤微生物生存、土壤有机质分解、土壤养分形成与积累的物理环境。因此,贝壳堤岛滩脊地带旱生灌草植被下的土壤可提供酸枣、杠柳等灌木利用土壤有效水分的潜力较大。

在 0—40 cm 的土层内,旱生、盐生灌草植被及盐生草本植被的土壤容重均值分别比裸地降低 20.8%, 14.5% 和 8.5%,而 3 种植被类型下的土壤总孔隙度分别比裸地高 46.1%, 21.8% 和 17.1%。这可能与滩脊地带旱生灌草植被茂盛,凋落物丰厚,利于贝壳砂土壤的分解细化有关;而向海侧经常受海浪侵蚀,植被郁闭度低,柽柳退化严重,季节性淹水使草本植被生长也较弱;向陆侧盐分含量高,草本植被覆盖度低,从而土壤改良效应较弱。3 种植被类型下的土壤

孔隙比分别表现为:旱生灌草地(1.20) > 盐生灌草地(0.83) > 盐生草地(0.78) > 裸地(0.60),不同植被类型的土壤上、下土层孔隙比的大小变化规律也基本一致。造成 3 种植被类型土壤物理性质存在差异的原因,可能与不同植被类型覆盖下的枯落物组成、分解状况和地下根系的生长发育不同有一定关系^[6]。从土壤容重和孔隙度综合分析,滩脊地带旱生灌草植被的土壤通气、透水及持水状况均比较协调,表明滩脊地带旱生灌草植被改良土壤基本物理性能最好。因此,在黄河三角洲贝壳堤 3 种植被类型中,土壤基本物理性状表现为滩脊地带的旱生灌草植被好于向海侧的盐生灌草植被,而向陆侧的盐生草本植被改良土壤容重和孔隙度效果较差。

表 2 贝壳堤不同植被类型的土壤容重和孔隙度

植被类型	土壤层次/cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	毛管孔 孔隙度/%	非毛管孔 孔隙度/%	土壤总孔 隙度/%
向海侧	0—20	1.34	35.41	12.32	47.73
盐生灌草	20—40	1.38	31.90	11.34	43.24
滩脊地带	0—20	1.23	45.46	10.43	55.89
旱生灌草	20—40	1.29	43.71	9.57	53.28
向陆侧	0—20	1.43	33.91	13.92	47.83
盐生草地	20—40	1.48	28.44	11.23	39.67
滩涂裸地	0—20	1.61	24.30	14.05	38.35
	20—40	1.56	23.93	12.42	36.35

3.2 不同植被类型下的土壤 pH 值和含盐量

土壤含盐量和 pH 值变化状况是黄河三角洲盐碱地反映植被改良土壤效应的重要参数^[13-14]。由图 1 可知,贝壳砂生境 3 种植被类型各土层的土壤 pH 值和含盐量均低于滩涂裸地各土层的对应值,其中 0—40 cm 土层土壤 pH 值均值大小表现为:旱生灌草地 < 盐生灌草地 < 盐生草地 < 裸地,分别比裸地降低 11.6%, 1.7% 和 0.5%。旱生灌草、盐生灌草、盐生草本植被的土壤含盐量均值分别比裸地下降了 88.2%, 59.0% 和 54.2%。这与向海侧和向陆侧微地形下土壤本身盐碱含量较高,而且地表覆盖度低、蒸发量大有关。而滩脊地带由于海拔较高,植被覆盖度高,在一定程度上抑制了地表蒸发,因此,滩脊地带灌草植被降盐功能较好。向海侧盐生灌草植被中柽柳为典型的泌盐植物,所以降盐抑碱功能优于向陆侧的单一草本植被。从垂直变化来看,3 种植被类型下的土壤含盐量均表现为 0—20 cm 低于 20—40 cm 土层;而 pH 值除裸地和旱生灌草植被表土层高于 20—40 cm 土层外,盐生灌草和草本植被均表现为表土层低于 20—40 cm 土层。可见,在贝壳砂生境下,不同

类型的植被对土壤均具有一定的压碱抑盐效果,表土层由于受枯枝落叶分解及覆盖的影响,改良盐碱效果优于 20—40 cm 土层。

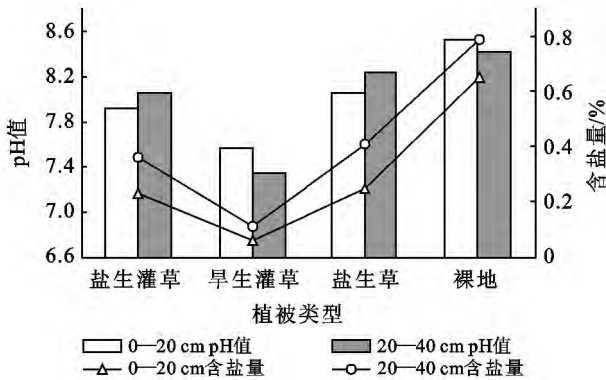


图 1 贝壳堤不同植被类型下的土壤含盐量和 pH 值

3.3 不同植被类型下的土壤入渗特征

土壤表层的入渗特征对地表径流的产生和流域产流量产生重要影响,是分析地表径流产生与否的前提和基础^[15-16]。由图 2 可以看出,贝壳堤 3 种植被类型土壤表层的渗透能力表现为:向陆侧盐生草 < 滩脊地带旱生灌草 < 向海侧盐生灌草 < 裸地,其中初始入渗率分别比裸地 (10.34 mm/min) 下降了 58.2%, 44.9% 和 25.9%; 稳渗速率分别比裸地 (5.78 mm/min) 下降了 66.3%, 46.1% 和 24.6%。一般来说,林地土壤的渗透性能越大,越利于降雨的下渗,不易形成地表径流,利于土壤水分的贮存,但由于沙地土壤孔隙较大,易漏水、保水性能差,因此,在一定程度上,土壤渗透性能的减弱有利于土壤水分的贮存^[11-12]。滩脊地带的旱生灌草和向陆侧的盐生灌草两种植被类型,均表现为土壤渗透性降低,即土壤沙性减弱,土壤表现出一定的保水性能,并且旱生灌草植被低于盐生灌草植被。但向陆侧的盐生草本植被,由于贝壳砂中混有较多的泥质盐碱土,土壤密实性较大,通气和透水性能降低,严重抑制了水分的下渗,因此其土壤贮蓄降雨的能力较弱。而滩涂裸地由于受海风的吹蚀,使其表层细小颗粒移动较大,表层土壤沙化严重,大颗粒贝壳砂较多,因此,初始入渗和稳定入渗能力均较强,漏水严重,不利于土壤水分的贮存。可见,贝壳沙滩脊地带旱生灌草植被改善土壤物理状况的效果最佳,其土壤水分渗透能力比滩涂裸地的明显降低,有利于土壤水分和肥力的保持,其次为向海侧的盐生灌草植被,而向陆侧盐生草本植被的土壤渗透能力最低,易形成地表径流。

3.4 不同植被类型下的土壤蓄水性能

土壤蓄水能力的增强能有效渗蓄降水,防止水土流失的发生^[8-10]。由表 3 可以看出,3 种植被类型下

的土壤饱和贮水量表现为:滩脊地带旱生灌草 > 向海侧盐生灌草 > 向陆侧盐生草,0—40 cm 土层的土壤饱和贮水量分别是裸地的 1.46, 1.22 和 1.17 倍,表明不同植被类型在减少地表径流,增强贝壳砂土壤蓄水及防止水土流失等方面均有一定作用,但不同植被类型之间差别较大,其中最大的是滩脊地带旱生灌草植被,其次为向海侧的盐生灌草植被,而向陆侧的草本植被由于土壤通气和透水性能差,其土壤水分贮蓄及调节能力均较弱。土壤蓄水能力主要表现在土壤毛管贮水能力上,土壤毛管贮水能力越高,土壤蓄水能力就越强。旱生灌草、盐生灌草及盐生草本植被 0—40 cm 土层的毛管贮水量分别是裸地的 1.85, 1.40 和 1.29 倍;表明不同植被类型改善了土壤蓄水性能,但以滩脊地带旱生灌草植被下的土壤蓄水性能最佳。

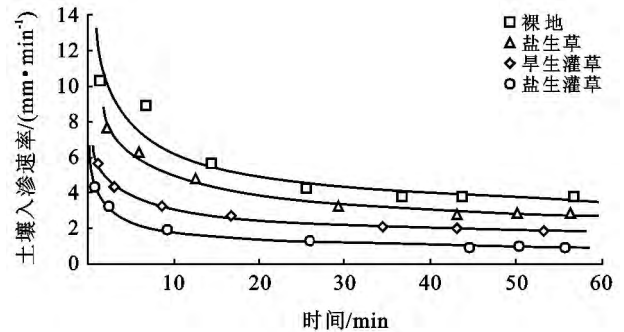


图 2 贝壳堤不同植被类型下的土壤入渗过程

表 3 贝壳堤不同植被类型的土壤蓄水性能

植被类型	土壤层次/cm	毛管贮水量/mm	非毛管贮水量/mm	土壤饱和贮水量/mm
向海侧	0—20	70.82	24.64	95.46
盐生灌草	20—40	63.80	22.68	86.48
滩脊地带	0—20	90.92	20.86	111.78
旱生灌草	20—40	87.42	19.14	106.56
向陆侧	0—20	67.82	27.84	95.66
盐生草	20—40	56.88	22.46	79.34
滩涂裸地	0—20	48.60	28.10	76.70
	20—40	47.86	24.84	72.70

0—40 cm 土层的非毛管贮水量大小表现为:旱生灌草 < 盐生灌草 < 盐生草 < 裸地。表明贝壳堤滩脊地带更利于贮存供植物生长利用的土壤水分,向陆侧盐生草本植被的土壤蓄水能力较弱,这与其草本层植被覆盖度低,土壤盐分含量高有一定关系。从垂直结构来看,3 种植被类型的土壤蓄水能力均表现为 0—20 cm 高于 20—40 cm 土层,表明表层土壤贮存水分的能力较强,这与其枯枝落叶分解形成一定厚度的腐殖质层和根系微生物活动有一定关系。

3.5 不同植被类型的土壤水文生态功能评价

贝壳堤 3 种植被类型土壤水文功能评价共选取 12 个指标,分别为土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、孔隙比、pH 值、含盐量、初始入渗速率、稳定渗透速率、毛管贮水量、非毛管贮水量和饱和贮水量。3 种植被类型下各指标的隶属函数值详见表 4。由表 4 可知,向海侧盐生灌草下隶属函数值较高的指标为土壤容重、非毛管孔隙度、含盐量、初始入渗率、稳渗速率和非毛管贮水量,主要表现在土壤容重和渗透特征上。滩脊地带旱生灌草下隶属函数值较高的指标为土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度、孔隙比、pH 值、含盐量、毛管贮水量和饱和贮水量,主要表现在土壤孔隙结构、降盐抑碱和贮水量特征上。向陆侧盐生草本下隶属函数值较高的指标为非毛管孔隙度、含盐量和非毛管贮水量上。由隶属函数总合计值可知,3 种植被类型的土壤水文功能表现为滩脊地带旱生灌草土壤水文功能最佳,其次为向海侧盐生灌草,而向陆侧盐生草本较差。

表 4 贝壳堤不同植被类型下各指标的隶属函数值

指标	植被类型			
	向海侧盐生灌草	滩脊地带旱生灌草	向陆侧盐生草	滩涂裸地
土壤容重 ⁻	0.697	1.000	0.394	0.000
毛管孔隙度 ⁺	0.466	1.000	0.345	0.000
非毛管孔隙度 ⁺	0.565	0.000	0.796	1.000
土壤总孔隙度 ⁺	0.402	0.852	0.316	0.000
孔隙比 ⁺	0.393	1.000	0.300	0.000
pH 值 ⁻	0.473	1.000	0.316	0.000
含盐量 ⁻	0.669	1.000	0.614	0.000
初始入渗率 ⁺	0.555	0.229	0.000	1.000
稳渗速率 ⁺	0.629	0.305	0.000	1.000
毛管贮水量 ⁺	0.466	1.000	0.345	0.000
非毛管贮水量 ⁺	0.566	0.000	0.796	1.000
饱和贮水量 ⁺	0.472	1.000	0.371	0.000
合计	6.353	8.386	4.594	4.000

注: + 表示正指标; - 表示负指标。

4 结论

(1) 黄河三角洲贝壳堤三种植被类型具有一定的改善土壤物理结构、增强土壤通气性和透水性能的作用,使贝壳砂土壤容重减小、孔隙度增大,且这种作用效果上层明显高于下层土壤。3 种植被类型对土壤均有一定的压碱抑盐效应,滩脊地带旱生灌草植被的土壤盐碱改良效果最佳,其次为向海侧的盐生灌草植被,而向陆侧的盐生草本植被降盐抑碱效果较差,并且不同植被类型表土层降盐碱效果优于 20—40 cm 土层。

(2) 在以向海侧和滩脊地带贝壳砂为主的梯度带内,土壤渗透能力的降低在一定程度上有利于土壤保水保肥供植物利用;随着距离海岸带的变远,土壤的渗透能力逐渐减弱。0—40 cm 土层的土壤饱和贮水量和毛管贮水量表现为:滩脊地带旱生灌草 > 向海侧盐生灌草 > 向陆侧盐生草 > 裸地,而非毛管贮水量则与之相反。3 种植被类型的土壤贮水能力均为 0—20 cm 高于 20—40 cm 土层。

(3) 采用模糊数学隶属函数评价,从土壤的水分物理指标及盐碱改良状况综合来看,贝壳堤 3 种植被类型的土壤水文功能表现为:滩脊地带的旱生灌草植被 > 向海侧的盐生灌草植被 > 向陆侧的盐生草本植被较差。

[参 考 文 献]

- [1] 田家怡,夏江宝,孙景宽,等. 黄河三角洲贝壳堤岛生态保护与恢复技术[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [2] 赵艳云,田家怡,孙景宽,等. 滨州北部贝沙堤生物多样性现状及影响因素的研究[J]. 水土保持研究,2010,17(2):136-140.
- [3] 赵艳云,胡相明,刘京涛. 贝壳堤地区微生物分布特征及其与植被分布的关系[J]. 水土保持通报,2012,32(2):267-270.
- [4] 夏江宝,孔雪华,陆兆华,等. 滨海湿地不同密度柞柳林土壤调蓄水功能[J]. 水科学进展,2012,23(5):628-634.
- [5] 徐丽宏,王彦辉,熊伟,等. 六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究[J]. 林业科学研究,2012,25(4):456-463.
- [6] 陈波,剪文灏,吕发,等. 冀北山地蒙古栎天然林土壤物理性质及水源涵养功能研究[J]. 水土保持通报,2013,33(2):83-86.
- [7] 刘小林,郑子龙,蔺岩雄,等. 甘肃小陇山林区主要林分类型土壤水分物理性质研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):7-11.
- [8] 周玮,朱军,吴鹏,等. 杠寨小流域不同植被下土壤水分物理特性的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(5):92-96.
- [9] Liu Xia, Zhang Guangcan, Gary C H. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009,154(1/2):123-130.
- [10] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [11] 王贵霞,李传荣,许景伟,等. 沙质海岸 5 种植被类型土壤物理性状及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2005,19(2):142-146.

(下转第 38 页)

- 社,2000.
- [7] 赵景波,曹军骥. 青海流域土壤水与土壤水库[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [8] 赵景波,曹军骥,侯雨乐. 青海湖北沙柳河镇土壤水分特征与植被建设[J]. 水土保持通报,2011,31(1):180-185.
- [9] 赵景波,祁子云,魏君平,等. 青海湖北土壤水分分布与土壤干层恢复[J]. 地理科学进展,2012,31(7):853-858.
- [10] Yuin E. An infiltration model to predict suction changes in the soil profile[J]. Water Resource Research, 1998,34(7):1617-1622.
- [11] Rapp I. Evaporation and crust imperdance role in seeding emergence[J]. Soil Science, 2000,165(4):354-364.
- [12] Ptrick J. Use of limited soil property data and modeling to estimate root zone soil water content[J]. Journal of Hydrology, 2003,272(1/4):131-147.
- [13] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data[J]. Journal of Hydrology, 2005,307(1/4):254-269.
- [14] Anne H, Tobias V, Katrin V, et al. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(17):2076-2087.
- [15] Sonia I S, Thierry C, Edouard L D, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2010,99(3/4):125-161.
- [16] Patricio G, You Jinsheng, Kenneth G H, et al. Soil water recharge in a semi-arid temperate climate of the Central U. S. Great Plains [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(7):1063-1069.
- [17] Zoltan B, Wolfgang W. Initial soil moisture retrievals from the METOP: A advanced scatterometer [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(20): 1-5.
- [18] 黄明斌,杨新良,李玉山,等. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报,2001,56(1):7-13.
- [19] Zhao Jingbo, Du Juan, Chen Baoqun. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007,17(1):114-126.
- [20] 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学,2005,41(4):155-161.
- [21] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报,2007,27(1):76-89.
- [22] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报,2000,14(4):87-90.
- [23] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(II):土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):5-8.
- [24] 赵景波,王长燕,岳应利,等. 西安地区人工林土壤干层与水分恢复研究[J]. 自然资源学报,2007,22(6):890-895.
- [25] 杜娟,赵景波. 西安地区不同植被下土壤含水量及水分恢复研究[J]. 水土保持学报,2006,20(6):59-61.
- [26] 赵景波,曹军骥. 青海湖流域土壤水与土壤水库研究[M]. 北京:科学出版社,2011.

(上接第 32 页)

- [12] 齐清,李传荣,许景伟,等. 沙质海岸不同植被类型土壤水源涵养功能的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):102-105.
- [13] 夏江宝,刘庆,谢文军,等. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(12):63-68.
- [14] 王晓芳,夏江宝. 黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的降盐改土功能[J]. 水土保持学报,2012,26(3):141-144.
- [15] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey lakes watershed, central Ontario [J]. Journal Hydrology, 2005, 306(1/4): 1-20.
- [16] Rosa J D, Cooper M, Darboux F, et al. Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogram-based index[J]. Soil and Tillage Research, 2012,124(8):226-232.