
试验研究

4 种不同植被群落类型表土的抗蚀力学特性

格日乐, 郝需婷¹, 苏日娜¹, 孙保平², 黄静¹, 崔天民¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 10083)

摘要: [目的] 研究黄土高原农林生产表层土壤水土流失, 为该区域及其相似地区生态修复中树种选择及配置提供科学依据。[方法] 以杨树+柠条乔灌混交林、杨树纯林、油松常绿针叶林和柠条灌木纯林下 4 种不同植被群落类型下表土为对象, 进行抗剪力学特性研究, 并分析土壤含水率对其力学特性的影响力。[结果] 在测试表土含水率 2.5%~12.5% 范围内, 4 种不同植被类型及裸地对照样地土壤结皮抗剪强度和黏聚力均随着土壤含水率的增加呈增大的趋势, 表明在一定范围内表土湿润程度的增加对提高土壤表层抗蚀能力起到积极作用; 4 种不同植被群落类型表土抗剪强度和黏聚力的值均显著大于裸地的值, 说明水土保持的林草措施对表层土壤结构的改善起到了促进作用, 从而提高了表层土壤的抗侵蚀能力; 在测试含水率 2.5%~12.5% 范围内随着含水率的增加各样地表土内摩擦角无明显的变化规律。[结论] 4 种不同植被群落类型中柠条+杨树混交林下表土抗剪强度、黏聚力总体表现最大, 这也从另外一方面说明了水土保持的林草措施中营造混交林的优越性。

关键词: 表土; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角; 土壤含水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0001-06

中图分类号: S152.7, S157.1

文献参数: 格日乐, 郝需婷, 苏日娜, 等. 4 种不同植被群落类型表土的抗蚀力学特性[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 1-6. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 03. 001; Ge Rile, Hao Xuting, Su Rina, et al. Mechanical properties of topsoil anti-erodibility under four different vegetation community types[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 1-6.

Mechanical Properties of Topsoil Anti-erodibility Under Four Different Vegetation Community Types

Ge Rile¹, Hao Xuting¹, Su Rina¹, Sun Baoping², Huang Jing¹, Cui Tianmin¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The soil erosion of topsoil in agricultural forestry production in Loess Plateau was researched in order to provide scientific basis for the selection and allocation of tree species in ecological restoration in this area and its similar areas. [Methods] The shear mechanical properties of topsoil under four different vegetation community types including poplar + *Caragana korshinskii* mixed forest, poplar pure forest, *Pinus tabulaeformis* evergreen coniferous forest and *C. korshinskii* shrub pure forest were studied, and the influence of soil moisture content on its mechanical properties was analyzed. [Results] In the range of 2.5%~12.5% of the water content of the test topsoil, the shear strength and adhesion of the surface soil were increased with the increase of soil moisture content in 4 different vegetation types and bare ground, indicating that the increase of soil moisture played a positive role in improving the anti-erodibility of soil surface in a certain range. The shear strength and adhesion values of topsoil under 4 different vegetation community types were significantly larger than those of bare land, which indicated that the soil and water conservation measures

收稿日期: 2018-10-02

修回日期: 2018-11-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“梯度应力下植物根系在固土抗蚀受损后自修复的生物力学响应机制”(41867011); 内蒙古自然科学基金项目(2017MS0407)

第一作者: 格日乐(1970—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼和浩特人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: gerile197081@126.com。

通讯作者: 郝需婷(1994—), 女(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔人, 硕士研究生, 研究方向为沙地生物资源保护与利用。E-mail: haoxuting123@126.com。

had improved surface soil structure, thus improving the anti-erodibility of the surface soil. There was no significant change in friction angle of surface soil with the increase of water content in the range of 2.5%~12.5%. [Conclusion] The shear strength and cohesion of the topsoil under the mixed forest of lime + poplar were the greatest among the four different vegetation community types, which also explained the superiority of mixed forest in forest and grass measures of soil and water conservation.

Keywords: topsoil; shear strength; cohesion; internal friction angle; soil moisture

土壤结皮是干旱、半干旱以及半湿润地区土壤普遍存在的现象^[1-7]。中国土壤类型众多,土壤理化性质差异很大,相应的土壤结皮发育亦有很大差异^[8-14]。现在针对中国 4 类典型土壤,黄土、紫色土、红壤、黑土等土壤结皮的发育及形成、结构特征、影响因素以及对土壤侵蚀的影响等方面的相关研究较多^[15-24]。而关于土壤结皮力学性质的研究鲜见报道。

土壤结皮在降雨引起的侵蚀过程中一方面通过压实土表增强其抗剪切应力,从而减少土表溅蚀量;另一方面,通过减少入渗增加径流,使产流产沙的临界雨强显著降低,从而加大产流产沙,并增加了产生细沟的可能性,使侵蚀量剧增。

黄土高原位于干旱半干旱的气候条件下,气候变化剧烈,干湿交替频繁发生,土壤胀缩交替进行,土壤表层结构很难得到进一步发育,土壤结构的稳定性通常很差,在暴雨或大暴雨的条件下,土壤极易遭受侵蚀,表层土壤水土流失是困扰黄土高原农林业生产的一大难题。

土壤抗蚀性指标很多,主要有土壤腐殖质的含量、水稳性团粒结构、土壤分散性和土壤侵蚀系数等。土壤水稳性团聚体的形成,要求有一定数量的胶结物质,又要求这种胶结物质遇到水后分散性小,而腐殖质就是具有这种性能的胶结物质。森林由于提高土壤腐殖质,必然会提高水稳性团粒的含量。林草覆盖的土壤,具有较强的抗蚀能力,从整个剖面来看,土壤结皮的抗蚀性比下层强,即越向深层土壤越易遭到侵蚀^[25]。

林分水土保持作用大小取决于森林植被的类型、结构、林龄、郁闭度以及降雨特征等。林分组成和结构对降水影响很大。树种不同,其枝叶密度及吸水能力、树冠大小和形状不同,截留率亦有差异。枯枝落叶层覆盖于林地地表不仅防止了雨滴击溅,维持土壤结构的稳定,腐烂分解后又增加土壤有机质,改良土壤结构,提高土壤肥力。

本文选取半干旱的内蒙古黄土丘陵沟壑区准格尔煤田矿区排土场相同立地条件下生物复垦土地不同同龄植被类型下表层土壤(0—2 cm)为研究对象,

通过室内直剪试验,研究不同植被类型下表土抗剪强度、黏聚力及内摩擦角等指标,及这些指标对表层土壤水分的响应,以期为该区域及其相似地区生态修复中植物种的选择及其配置提供科学依据,也为土壤侵蚀机理的研究提供科学依据。

1 材料及方法

1.1 研究区自然概况

黑岱沟露天煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗东部,海拔在 1 025~1 302 m 之间,地理坐标东经 111°13′—111°20′,北纬 39°43′—39°49′,属于晋、陕、蒙接壤黄土地区一部分。因侵蚀较强烈,矿区的地带性土壤不明显,非地带性黄绵土广泛分布。排土场台阶上的土壤为复填土,经排土车辆碾压较紧密。

1.2 试验方法

1.2.1 表土采集及其试样制备 不同植被类型表土抗剪力学特性的研究选择在黑岱沟露天煤矿的内排土场平台(海拔高度 1 255 m)复垦土地上相同立地条件下在 8~10 a 生柠条+杨树混交林、杨树纯林、柠条纯林和油松纯林等不同植被群落内选择典型样地以及未复垦土地做对照样地,于 2017 年 8 月末在每个植被类型下以及对照裸地选取 3 块未受扰动典型样地,样地大小 5 m×5 m,每个样地内随机选取 3 个点,且样点之间距离至少大于 80 cm 以保证采样点间采样时避免造成互相影响。采用高 20 mm,直径 61.8 mm 的环刀取样,取样时先将样点处植物地上部轻轻剪除,尽量避免对表层土壤的扰动,选取表层平整处进行取样,取得的样品用塑料薄膜密封,置于减震箱内,带回实验室分别用于测定土壤的抗剪强度、含水率、干密度等。植物样地天然含水率和密度测定方法已另文发表^[26],这里不再赘述。测定结果为天然含水率 5.02%,干密度 1.42 g/cm³。

不同土壤含水率下试样的制备根据土工试验规程^[27]进行:野外实测表层土壤天然含水率为 5.02%,干密度 1.42 g/cm³,据此选择小于实测天然含水率的值 2.5%和大于天然含水率的值 7.5%,10%,12.5%的 4 个含水率,共设置 5 个梯度,分别为:

2.5%,5.0%,7.5%,10.0%,12.5%进行不同含水率下直剪试验。

1.2.2 试验仪器及方法 使用ZJ型四联应变控制式电动直剪仪进行,严格按照土工试验规程^[27]进行剪切试验。天然状态下表层土壤抗剪强度的测定,要保证环刀内的土样基本保持天然的干密度与含水率。剪切速率为0.8 mm/min,每组试验做4个荷载的试样,每个荷载下做3个平行,按土工试验规范进行。

2 结果与分析

2.1 垂直荷载与抗剪强度的关系

图1为天然状态下土壤含水率5.0%,干密度 1.42 g/cm^3 下4种不同植被类型及裸地样地土壤表层(结皮)的直剪试验结果。从图1中可以看出土壤表层抗剪强度均随着垂直荷载的增大而增大,且在0.05的显著水平下抗剪强度与垂直荷载呈线性正相关,其它4个不同土壤含水率2.5%,7.5%,10%,12.5%下直剪试验结果与5%下的结果一致(图略),均在0.05的显著水平下抗剪强度与垂直荷载呈线性正相关。证明供试不同植被类型(生物土壤结皮,简称生物结皮)及裸地样地土壤表层(物理结皮)的剪切关系均服从土力学上的摩尔-库伦强度破坏准则,据此可以采用摩尔-库伦强度破坏准则推求供试土壤表层(结皮)的黏聚力和内摩擦角。

2.2 不同植被类型下表土抗剪强度

图2为4种不同植被类型及裸地表层土壤抗剪强度随着土壤含水率的变化特征,LSD多重比较结果显示,在0.05的显著水平下图中字母不同则表示差异性显著,包含有相同字母的则表示差异性不显著。从图2中可以看出,4种不同植被类型及裸地样表土均随着含水率的增加抗剪强度总体呈增大的趋势。

从图3中可以看出,在0.05水平下5个测试土壤含水率梯度下裸地样地表层土壤抗剪强度均最小,而柠条+杨树混交林下表层土壤抗剪强度最大。在天然含水率5%时表土抗剪强度大小为柠条+杨树混交林($11.35^D \pm 1.74$)>杨树纯林($8.28^C \pm 0.92$),而杨树纯林和油松针叶林($7.38^{BC} \pm 1.01$)二者则在0.05的显著水平下无显著性差异,油松纯林与柠条纯林($6.54^B \pm 0.79$)表土抗剪强度的值在0.05的显著水平下又无显著性差异,4种不同植被群落类型表土抗剪强度的值均显著大于裸地($2.72^A \pm 0.46$)的值。这说明水土保持的林草措施对表层土壤结构的改善起到了积极的作用,从而提高了表层土壤的抗侵蚀能力,且表土含水率、植被群落类型不同则对表土抗剪强度的提高值则不同。

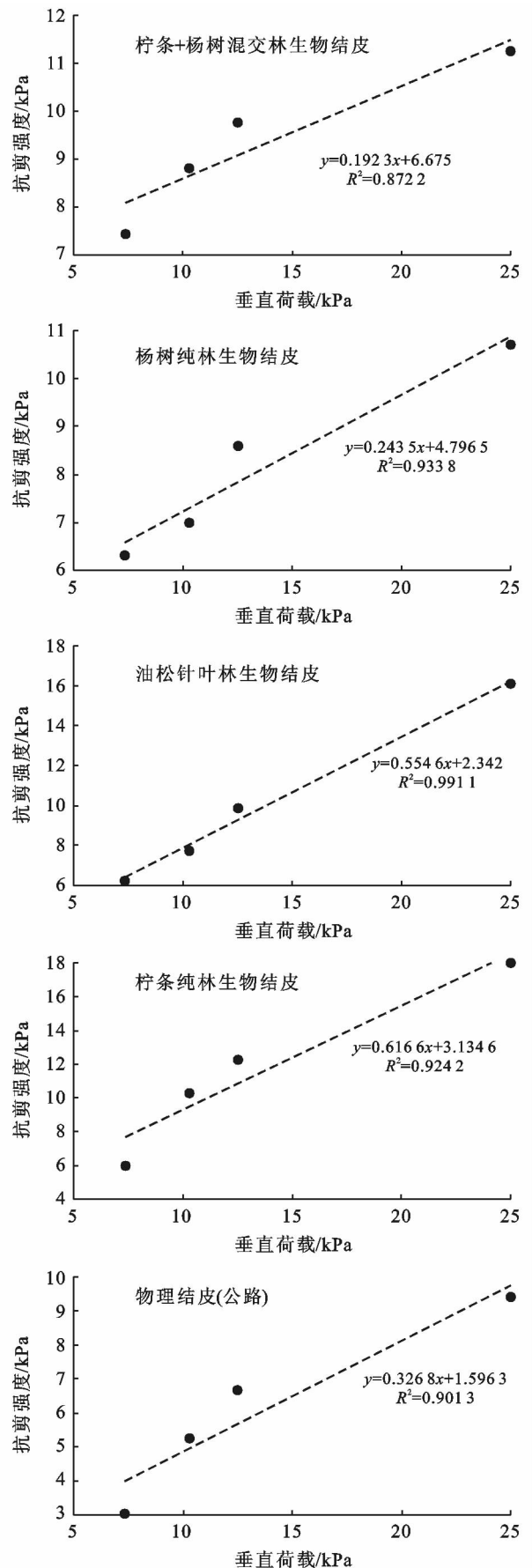
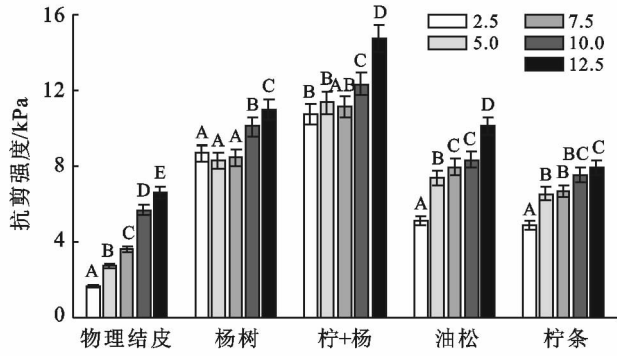


图1 不同植被类型及裸地表层土壤抗剪强度与垂直荷载的关系



注:图中不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 4 种不同植被类型及裸地土壤结皮抗剪强度随着土壤含水率的变化

从表 1 中可以看出随着含水率的增加 4 种不同植被类型及裸地样地表土黏聚力总体呈增加的趋势。这是因为当土壤含水率较小时,土粒之间较松散,尚

未形成较强的联结,从而使土体间的联结较弱。随着土壤含水率的增加,土粒与水之间形成结合水膜,水胶结逐渐增强,从而提高了土颗粒间的咬合能力。表明在一定范围内随着表土湿润程度的增加对提高土壤表层抗蚀能力起到积极的作用。

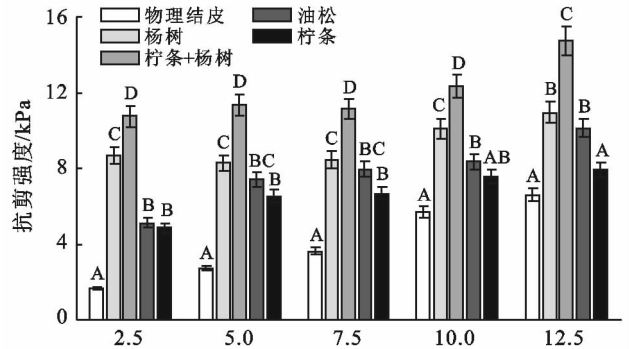


图 3 相同含水率下 4 种不同植被类型及裸地样地抗剪强度比较结果

表 1 相同植被类型在不同土壤含水率下土壤结皮黏聚力的方差分析结果

植被类型	不同土壤含水率时土壤结皮黏聚力/kPa					趋势
	2.5%	5%	7.5%	10%	12.5%	
裸地(对照)	0.25 ^A ±0.02	1.60 ^{AB} ±0.17	3.18 ^B ±0.36	4.34 ^{BC} ±0.25	5.39 ^C ±0.43	增加
杨树纯林	3.94 ^A ±0.32	4.80 ^A ±0.23	7.50 ^B ±0.41	7.31 ^B ±0.47	9.43 ^C ±0.74	增加
柠条+杨树混交林	5.68 ^A ±0.38	6.68 ^A ±0.56	8.01 ^{AB} ±0.84	9.27 ^B ±0.76	11.22 ^C ±1.48	增加
油松纯林	0.83 ^A ±0.07	2.34 ^{AB} ±0.13	3.56 ^B ±0.21	5.39 ^C ±0.59	6.81 ^D ±0.63	增加
柠条纯林	2.18 ^A ±0.11	3.13 ^{AB} ±0.26	4.42 ^B ±0.46	6.85 ^{CZ} ±0.38	7.38 ^C ±0.68	增加

注:不同大写字母表示差异性显著,相同字母表示差异性不显著, ($p < 0.05$)。下同。

另外在 0.05 水平下对相同含水率下不同植被类型及裸地对照样地表土黏聚力进行方差分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知柠条+杨树混交林下表土黏聚力在测试含水率 5%,10%和 12%下黏聚力值均为最大,其次为杨树纯林下的值。在含水率 2.5%和

7.5%时柠条+杨树混交林和杨树纯林下表土黏聚力的值显著大于其他样地的值,且二者无显著性差异。在测试的 5 个含水率梯度下 4 种不同植被群落类型表土黏聚力的值均显著大于无植物生长的裸地样地的值。

表 2 相同含水率下 4 种不同植被类型及裸地样地表土黏聚力方差分析结果

土壤含水率/%	不同植被类型表土黏聚力/kPa				
	裸地	杨树纯林	柠条+杨树混交林	油松纯林	柠条纯林
2.5	0.25 ^A ±0.02	3.94 ^{BC} ±0.32	5.68 ^C ±0.38	0.83 ^A ±0.07	2.18 ^B ±0.11
5.0	1.60 ^A ±0.17	4.80 ^C ±0.23	6.68 ^D ±0.56	2.34 ^{AB} ±0.13	3.13 ^B ±0.26
7.5	3.18 ^A ±0.36	7.50 ^C ±0.41	8.01 ^C ±0.84	3.56 ^{AB} ±0.21	4.42 ^B ±0.46
10.0	4.34 ^A ±0.25	7.31 ^C ±0.47	9.27 ^D ±0.76	5.39 ^{AB} ±0.59	6.85 ^B ±0.38
12.5	5.39 ^A ±0.43	9.43 ^C ±0.74	11.22 ^D ±1.48	6.81 ^{AB} ±0.63	7.38 ^B ±0.68

2.3 不同植被类型下表土的内摩擦角

表 3 为相同植被类型在不同含水率下的内摩擦角方差分析结果。从表 3 中可以看出,随着表土含水率的增加,内摩擦角无明显的变化规律,这与黏聚力随着含水率的增加而增加的结果不同。

表 4 为相同含水率下不同植被类型及裸地表土

内摩擦角的方差分析结果。从表 4 中可以看出,在 5 种表土含水率下,柠条纯林与油松针叶林下的表土内摩擦角无显著性差异($p < 0.05$),而二者与其他 3 种样地表土内摩擦角存在显著性差异($p < 0.05$),且油松纯林和柠条纯林下表土内摩擦角显著大于其他 3 种样地的值。

表3 相同植被类型在不同含水率下的表土内摩擦角方差分析

植被类型	不同土壤含水率时表土内摩擦角/(°)					趋势
	2.5%	5%	7.5%	10%	12.5%	
裸地(对照)	18.29 ^A ±1.76	18.11 ^A ±1.66	17.98 ^A ±1.81	19.63 ^B ±1.84	18.54 ^A ±1.64	变幅较窄,规律不明显
杨树纯林	15.12 ^B ±1.31	13.69 ^A ±1.22	14.01 ^A ±1.14	14.75 ^{AB} ±1.37	15.66 ^B ±1.53	变幅较窄,规律不明显
柠条+杨树混交林	12.05 ^B ±1.11	10.89 ^A ±1.04	11.46 ^B ±1.23	12.11 ^B ±1.37	11.73 ^{AB} ±1.09	变幅较窄,规律不明显
油松纯林	29.88 ^B ±3.04	29.01 ^A ±2.34	29.73 ^B ±2.77	28.97 ^A ±2.31	30.02 ^B ±2.53	变幅较窄,规律不明显
柠条纯林	32.74 ^B ±1.77	31.66 ^A ±2.56	31.41 ^A ±2.87	32.69 ^B ±3.01	31.95 ^{AB} ±2.98	变幅较窄,规律不明显

表4 相同含水率下4种不同植被类型及裸地样地内表土摩擦角的方差分析

土壤含水率/%	不同植被类型时表土内摩擦角/(°)				
	裸地	杨树纯林	柠+杨混交林	油松纯林	柠条纯林
2.5	18.29 ^B ±1.76	15.12 ^{AB} ±1.31	12.05 ^A ±1.11	29.88 ^C ±3.04	32.74 ^C ±1.77
5.0	18.11 ^B ±1.66	13.69 ^A ±1.22	10.89 ^A ±1.04	29.01 ^C ±2.34	31.66 ^C ±2.56
7.5	17.98 ^B ±1.81	14.01 ^{AB} ±1.14	11.46 ^A ±1.23	29.73 ^C ±2.77	31.41 ^C ±2.87
10.0	19.63 ^B ±1.84	14.75 ^A ±1.37	12.11 ^A ±1.37	28.97 ^C ±2.31	32.69 ^C ±3.01
12.5	18.54 ^B ±1.64	15.66 ^B ±1.53	11.73 ^A ±1.09	30.02 ^C ±2.53	31.95 ^C ±2.98

3 结论与讨论

4种不同植被类型及裸地样地表土剪切关系服从土力学上的摩尔—库伦强度破坏准则,可以采用摩尔—库伦强度破坏准则推求表土的黏聚力和内摩擦角。4种不同植被类型及裸地样地表土抗剪强度和黏聚力在测试含水率2.5%~12.5%范围内均随着土壤含水率的增加总体呈增大的趋势,表明在一定范围内随着表土湿润程度的增加对提高土壤表层抗蚀能力起到促进的作用;在测试含水率2.5%~12.5%范围内4种不同植被群落类型表土抗剪强度、黏聚力的值均显著大于裸地的值,这与其它研究者的结论一致^[26,28-30];解明曙^[31]采用根系拉拔试验法,研究了白榆(*Ulmus pumila*)根系的固土能力,结果认为根—土复合体的抗剪强度远高于素土;Waldron和Dakesian^[32]、陈昌富^[33]及刘秀萍^[34]通过试验比较了有根系土壤与无根系土壤的抗剪强度,结果均表明根—土复合体可以明显提高土体的抗剪强度,同时,根系的存在增加了土体的抗侵蚀能力。这说明水土保持的林草措施对表层土壤结构的改善起到了积极的作用,从而提高了表层土壤的抗侵蚀能力。4种不同植被群落类型相比较其中柠条+杨树混交林下表土抗剪强度、黏聚力总体表现最大,这也从另外一方面说明了水土保持的林草措施中营造混交林优于纯林,体现了混交林的优越性。各样地表土含水率、植被群落类型不同则对表土抗剪强度和黏聚力的提高幅度不同,反映了水土保持的林草措施中植物种选择和搭配的重要性。在测试含水率2.5%~12.5%范围内随着

表土含水率的增加,内摩擦角则无明显的变化规律,这与抗剪强度和黏聚力随着含水率的增加而增加的结果不同。关于这点还需要结合土壤理化性质进行进一步分析研究。

4种不同植被类型及裸地样地表土抗剪强度和黏聚力在测试含水率2.5%~12.5%范围内均随着土壤含水率的增加总体呈增大的趋势,这与格日乐等^[26]对柠条、沙棘和杨柴根土复合体抗剪强度的研究中随着土壤含水率的增高根土复合体的抗剪强度和黏聚力呈现先增大后减小的趋势的研究结论不同,分析原因格日乐等人对3种植物根土复合体抗剪特性的研究中含水率范围为1.44%~24.50%,而本文对表土含水率的研究范围为2.5%~12.5%,即本文中含水率取值范围较小的缘故。

[参 考 文 献]

- [1] 卜崇峰. 表土结皮的发育机理及其侵蚀效应研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
- [2] 李朝霞,王天巍,史志华,等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J]. 水土保持研究,2005,19(1): 11-14.
- [3] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48 (5):1137-1143.
- [4] Bradford J M. Interrill soil erosion processes: Effect of surface sealing on infiltration, runoff and soil splash de-tachmen[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987,51(6):1566-1577.
- [5] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill

- soil erosion[J]. Soil Science Society of America Journal 1994,58(1):352-356.
- [6] 王辉,王全九,邵明安,等.表土结皮影响坡地产生沙及养分流失的试验研究[J].水土保持学报,2008,22(4):35-38.
- [7] Ekwue E I. Effect of peat content, rainfall duration and aggregate size on soil crust strength, rainfall duration and aggregate size on soil crust strength[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991,16(6):431-436.
- [8] Gal M, Arcon L, Shainberg I. Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure scanning electron microscope observations [J]. Soil Science, 1984,48:872-878.
- [9] Morin J, Van Winkel J. The effect of eaindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. Soil Science, 1996,60(4):1223-1227.
- [10] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.降雨及聚丙烯酰胺(PAM)作用下土壤的封闭过程和结皮的形成[J].生态学报,2002,22(5):674-681.
- [21] 胡霞,蔡强国,刘连友,等.人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征[J].土壤学报,2005,42(3):504-507.
- [12] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- [13] Hussain S M, Smillie G W, Couins J F. Laboratory studies of crust development in Irish an Iragi[J]. Soil and Tillage Research, 1985,5:33-35.
- [14] Remley P A, Bradford J M. Relationship of soil crust morphology to inter-rill erosion parameters [J]. Soil Science Society of America Journal, 1989,53(4):1215-1221.
- [15] Eldridge D J, Bradstock R A. The effect of time since fire on the cover and composition of cryptogamic soil crusts on a *Eucalyptus* shrubland soil [J]. Cunninghamia, 1994,3:581-599.
- [16] 唐泽军,左海萍,于键,等.ESP值和黏粒含量对土壤表面封闭作用的影响[J].农业工程学报,2007,23(5):51-55.
- [17] 程琴娟,蔡强国,马文军.我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J].地理研究,2008,27(6):1290-1298.
- [18] 范云涛,雷廷武,蔡强国.湿润速度和累积降雨对土壤表面结皮发育的影响[J].土壤学报,2009,46(5):764-771.
- [19] 卜崇峰,石长春,蔡强国.土壤结皮几种分析测算指标的应用评价[J].水土保持学报,2009,23(2):240-243.
- [20] 程琴娟,蔡强国.模拟降雨下黄土表土结皮的侵蚀响应[J].水土保持学报,2013,27(4):73-77.
- [21] 程琴娟,蔡强国,郑明国.黄土土壤结皮对产流临界雨强的影响分析[J].地理科学,2007,27(5):678-682.
- [22] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].水土保持学报,2011,25(4):6-11.
- [23] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].农业工程学报,2014,30(1):73-80.
- [24] 李晓丽,申向东.结皮土壤的抗风蚀性分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):203-207.
- [25] 余新晓,陈丽华.黄土高原沟壑区土壤抗蚀性的初步研究[J].北京林业大学学报,1988,10(1):28-34.
- [26] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.
- [27] 南京水利科学研究所土工研究所.土工试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [28] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.土壤水分对植物根—土界面相互作用特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):135-140.
- [29] 张欣,姚喜军,刘静,等.土壤孔隙水承压条件下4种根—土复合体抗剪特性[J].水土保持通报,2010,30(4):22-26.
- [30] 格日乐,左志严,蒙仲举,等.杨柴根系提高土体抗剪特性的研究[J].水土保持学报,2014,28(4):72-77.
- [31] 解明曙.林木根系固坡力学机制研究[J].水土保持学报,1990,4(3):7-14.
- [32] Waldrom L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shears resistance from root propenies [J]. Soil Science, 1981,132(6):427-435.
- [33] 陈昌富,刘怀星,李亚军.草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J].中南公路工程,2006(2):14-17.
- [34] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰.林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J].北京林业大学学报,2006,17(5):67-72.