

# 苔藓植物护坡及固土作用试验研究

赵海燕<sup>1</sup>, 郭荣慧<sup>2</sup>, 段宇涛<sup>1</sup>, 章浩天<sup>1</sup>, 谌文武<sup>1,3</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000 ;

2. 兰州大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730000 ;

3. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000 )

**摘要:** 以兰州市榆中县夏官营古城的黄土苔藓坡面为研究对象, 通过野外调查, 研究其生长的环境特征; 选择有代表性的自然坡面进行风蚀、雨蚀实验, 研究苔藓坡面的抗风蚀、抗雨蚀能力; 取当地的原状土样进行室内土工实验, 研究其强度特征。实验结果表明: 苔藓能显著提高黄土坡面的抗风蚀、抗雨蚀能力和抗剪强度。苔藓覆盖度越大, 抗风蚀、雨蚀能力越强, 相比较无苔藓的坡面, 苔藓覆盖度达到 40% 时, 抗风蚀能力可提高 2-3 倍, 抗雨蚀能力可提高 3-4 倍, 超过 40% 后, 提高幅度会下降。随着苔藓覆盖度增大, 原状土样的内聚力显著增大, 抗剪强度整体增大。

**关键词:** 抗剪强度; 干旱地区; 水土流失; 侵蚀模量; 苔藓盖度

**中图分类号:** TU42

## Experimental research on slope protection and soil reinforcement for moss

ZHAO Haiyan<sup>1</sup>, GUO Ronghui<sup>2</sup>, DUAN Yutao<sup>1</sup>, ZHANG Haotian<sup>1</sup>, CHEN Wenwu<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. College of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** On moss slope of Xiaguanying ancient city as the research object, in Yuzhong County of Lanzhou City, based on field investigation, this paper studied moss growth environment characteristics; selecting a representative natural slope for wind erosion, rain erosion test in order to research the capability of mossy slope resistant to wind erosion and rain erosion; taking original state soil samples of local for soil test indoor to study the strength characteristics. The experimental results show: moss can significantly improve the loess slope stability of anti-wind erosion, anti-rain erosion capacity and shear strength. The greater the moss coverage, the stronger the ability to resist wind erosion and rain erosion when pared to the slope without moss, moss coverage reached 40%, anti-wind erosion capacity can be increased 2-3 times, also resistance to rain erosion capacity can be increased 3-4 times; more than 40%, the increase rate will decline. With increase of the moss-covered, undisturbed soil samples significantly increase the cohesion, also the shear strength of the overall increase.

**Key words:** Shear strength; arid areas; soil erosion; erosion modulus; moss coverage

## 0 引言

黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的区域之一, 水土流失严重, 是长期以来生态环境治理的重点和难点<sup>[1-3]</sup>。目前, 很多学者根据黄土高原植被演化的特点, 提出利用生物结皮<sup>[4]</sup>来治理水土流失的新方法, 相关的研究认为, 生物结皮能够改变表层土壤的理化性质<sup>[5-8]</sup>。生物结皮不仅能够通过削减雨滴动能来降低土壤流失量<sup>[9]</sup>, 同时还能够增加土壤的有机质含量<sup>[6,10-12]</sup>, 降低土壤 pH<sup>[5-7]</sup>, 提高速效养分、全量养分含量<sup>[5,6,13]</sup>以及增加粘粒粉粒含量<sup>[5,6]</sup>等。

**基金项目:** 兰州大学国家级大学生创新创业训练计划项目资助 (201610730132)

**作者简介:** 赵海燕 (1993-), 女, 兰州大学土木工程与力学学院地质工程本科生, 研究方向: 边坡工程等  
**通信联系人:** 谌文武 (1966), 男, 河南信阳人, 博士, 教授, 从事地质工程、岩土工程和文物保护工程的研究; 电话: 0931-8914308. E-mail: sungp@lzu.edu.cn

此外, 有相关研究表明生物结皮能显著降低了土壤的可侵蚀性<sup>[9,14]</sup>。

45 生物土壤结皮(生物结皮)指由不同种类的苔藓、地衣、藻类、地钱、真菌、蓝藻和细菌等与其下层很薄的土壤共同形成的一个复合的生物土壤层<sup>[15,16]</sup>, 是干旱、半干旱地区普遍存在的地被物。近年来, 由于退耕还林还草工程的实施, 黄土丘陵区生物结皮广为发育, 盖度可达 70% 以上, 与高等植被共同覆盖地表<sup>[4]</sup>。以往学者的研究主要以生物结皮这个复合系统作为研究对象, 认为生物结皮对黄土的保护主要依靠于覆盖作用<sup>[12]</sup>。苔藓植物是从水生到陆生过渡的一大类群, 由于其配子体独立生活, 孢子体寄生在配子体上, 缺少真正的木质素等特征被认为是现存的最原始的陆生植物<sup>[17,18]</sup>, 是仅次于种子植物的高等植物<sup>[19,20]</sup>。苔藓结皮是生物结皮的高等阶段, 其在保持水土方面的影响深刻<sup>[6]</sup>, 应作为一个单独的系统进行研究。本文作者以兰州市榆中县夏官营古城的苔藓坡面为研究对象, 通过野外调查, 研究其生长的环境特征; 选择有代表性的自然坡面进行风蚀、雨蚀实验, 研究苔藓对黄土坡面的水土保持效果; 取当地的原状土样进行室内的土工实验, 研究其强度特征。

## 1 抗侵蚀实验

根据苔藓的覆盖度、坡面倾角的需要, 选择有代表性的、自然稳定的黄土坡面, 选取 50cm\*50cm 的坡面为研究区域, 模拟风蚀和雨蚀环境, 研究苔藓在提高黄土坡面抗侵蚀能力方面的作用。

### 60 1.1 抗雨蚀实验

选择倾角和苔藓覆盖度适宜的自然坡面, 在选定的区域四周挖一条细沟, 通过控制降水量和降水高度两个变量模拟冲刷, 收集经由坡面流下的水和泥土, 用量筒测量流下的水、泥混合物的体积, 通过前后两次溶液体积的比值来反映黄土坡面受冲刷的严重程度。本实验采用交叉实验的思想, 共设置了 4 个梯度的苔藓覆盖度、3 个梯度的坡脚、2 个梯度的降水高度、3 个梯度的降水量进行组合。组合结果如表 1。

表 1 模拟雨水冲刷实验组合

Table 1 Simulation rainfall test compositions

苔藓覆盖度	坡面倾角	降水量 ml/min	降水高度 cm
0%	45°, 60°, 72°	500,1000,1500	50,100
40%	45°, 60°, 72°	500,1000,1500	50,100
88%	45°, 60°, 72°	500,1000,1500	50,100
95%	45°, 60°, 72°	500,1000,1500	50,100

获得的苔藓覆盖度与水土流失百分比的关系曲线如图 1。由图 1 可知: 苔藓能显著提高黄土坡面的抗雨蚀能力。随着苔藓覆盖度的增大, 水土流失百分比在显著降低。当降水量小于 1000ml/min, 覆盖度达到 88% 的苔藓坡面比没有苔藓覆盖的坡面抗雨蚀能力提高 3-4 倍。

若苔藓覆盖度较低, 覆盖度的增长对提高坡面的抗雨蚀能力贡献很大, 当覆盖度超过 40% 后, 覆盖度增高会提高坡面的抗雨蚀能力, 但是提升效果不明显。

在苔藓覆盖度相同时, 降水高度、降水量、坡面的倾角也会影响坡面的抗雨蚀能力。总的规律是: 坡面倾角越大, 降水量越大, 降水高度越大水土流失越严重。若坡面的苔藓盖度较低, 坡面倾角、降水量、降水高度对水土流失的影响力依次降低, 若苔藓盖度较高, 降水量的影响力最大。但是, 无论在何种组合环境中, 苔藓都有效的提高黄土坡面的抗雨蚀能力。

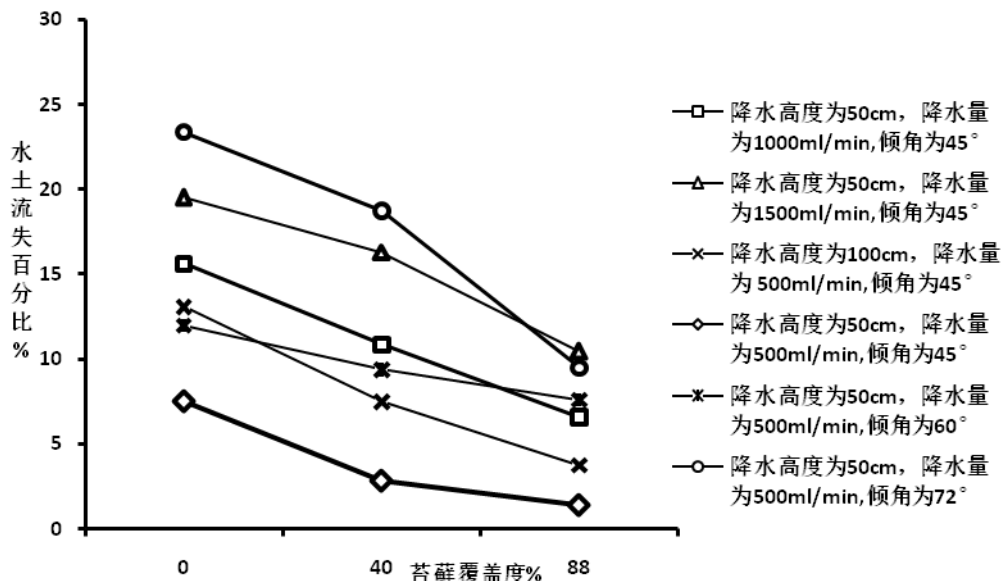


图 1 苔藓覆盖度与水土流失百分比的关系

Fig.1 The relationship between Moss coverage and soil erosion percentage

80 1.2 抗风蚀实验

根据坡脚和苔藓盖度的设置梯度，选择有代表性的、面积为 50cm\*50cm 的自然稳定坡面进行风蚀实验。称取 200g 密度为 1.425g/cm<sup>3</sup>的标准砂，均匀的撒在所选区域内，用鼓风机分别从不同的方向吹坡面，鼓风机持续作用的时间分别为 10min 和 20min，将坡面上剩余的砂子用毛刷全部刮下，称量剩余砂子的质量，计算砂子的质量损失百分比，换算成砂子的侵蚀模量。做出苔藓盖度与砂子质量损失百分比的关系曲线如图 2。本实验通过控制风的吹程、风作用的时间、风向、苔藓盖度几个变量，采用控制变量的实验方法，实验组合如表 2。

85

表 2 风蚀实验组合

Table 2 Combinations of wind erosion experiment

苔藓盖度	风程	风向	风时
0%	30cm,50cm,100cm	垂直坡面, 与坡面成 45°角	10min, 20min
40%	30cm,50cm,100cm	垂直坡面, 与坡面成 45°角	10min, 20min
88%	30cm,50cm,100cm	垂直坡面, 与坡面成 45°角	10min, 20min
95%	30cm,50cm,100cm	垂直坡面, 与坡面成 45°角	10min, 20min

90 由图 2 可知：苔藓有效的提高了黄土坡面的抗风蚀能力，随着苔藓高度增大，抗风蚀能力增强。相比较无苔藓的坡面，当苔藓盖度达到 95%时，其抗风蚀能力可提高 2-3 倍。

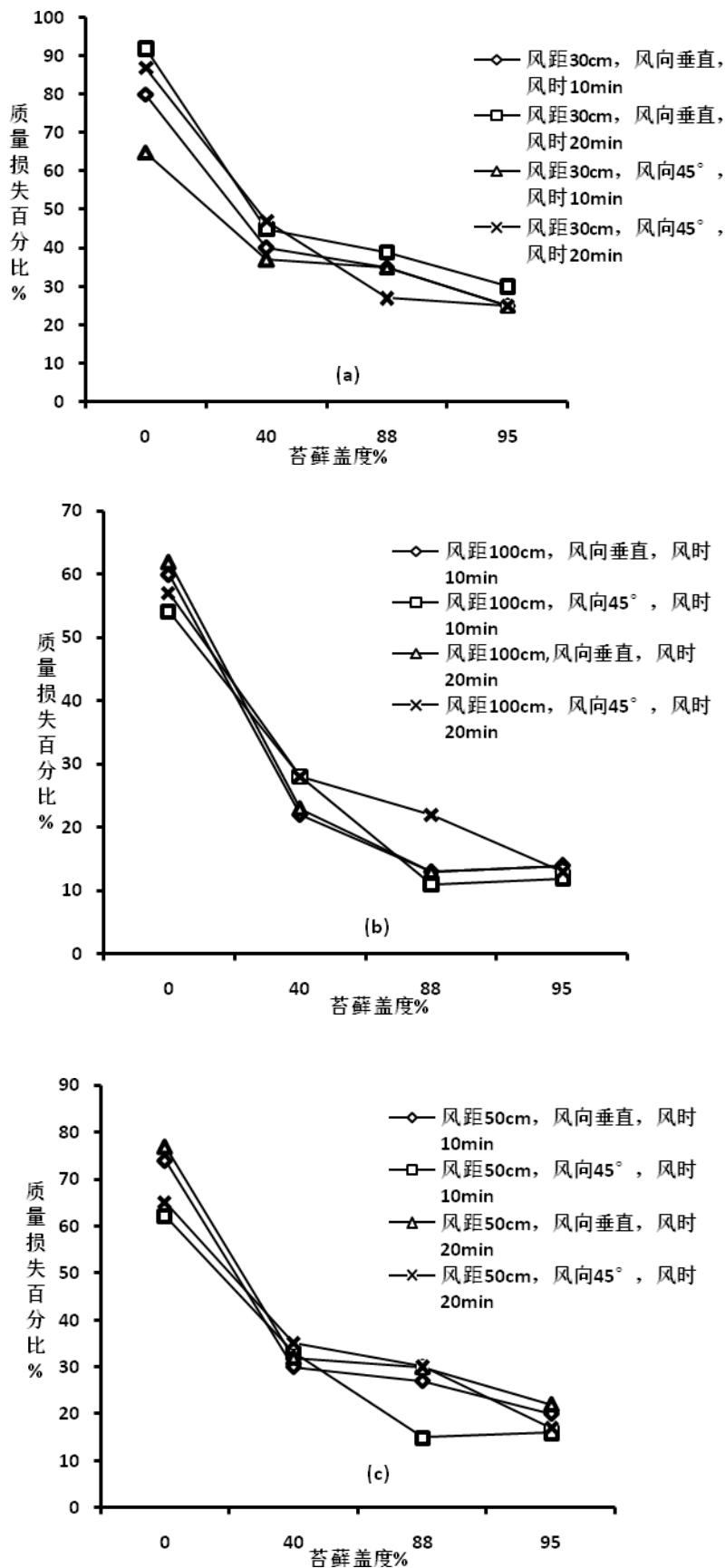


图 2 苔藓盖度与砂子质量损失量的关系

Fig.2 The relationship between Moss coverage and sand mass loss

拟合不同的风程、风时、风向环境中苔藓盖与砂子质量损失量的关系，得到一系列的相关方程和相关系数，如表 3。

表 3 不同组合环境中苔藓盖度与砂子质量损失量的相关性

100

Table 3 The relevance of moss coverage and sand mass loss in different combinations environments

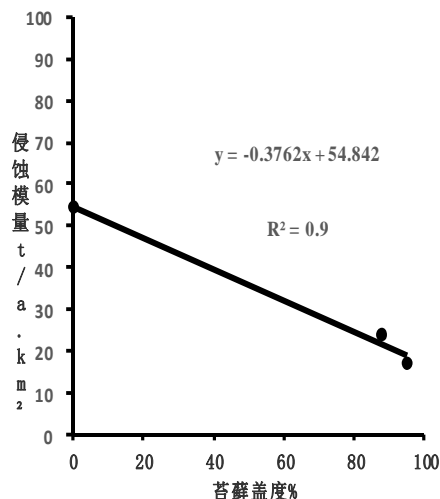
不同组合环境	相关方程	相关系数
风程 30cm,风向垂直, 风时 10min	$y = -0.5503x + 80.235$	$R^2 = 0.9889$
风程 30cm,风向垂直, 风时 20min	$y = -0.6457x + 92.057$	$R^2 = 0.9995$
风程 30cm,风向 45°, 风时 10min	$y = -0.3871x + 65.279$	$R^2 = 0.9692$
风程 30cm,风向 45°, 风时 20min	$y = -0.5758x + 76.245$	$R^2 = 0.9367$
风程 50cm,风向垂直, 风时 10min	$y = -0.5539x + 74.119$	$R^2 = 0.9972$
风程 50cm,风向垂直, 风时 20min	$y = -0.5599x + 77.156$	$R^2 = 0.9953$
风程 50cm,风向 45°, 风时 10min	$y = -0.4825x + 58.4$	$R^2 = 0.9565$
风程 50cm,风向 45°, 风时 20min	$y = -0.4597x + 65.374$	$R^2 = 0.961$
风程 100cm,风向垂直, 风时 10min	$y = -0.5054x + 59.826$	$R^2 = 0.9928$
风程 100cm,风向垂直, 风时 20min	$y = -0.5271x + 61.821$	$R^2 = 0.993$
风程 100cm,风向 45°, 风时 10min	$y = -0.4423x + 50.908$	$R^2 = 0.9608$
风程 100cm,风向 45°, 风时 20min	$y = -0.5271x + 61.821$	$R^2 = 0.993$

由表 3 可知：在不同的风程、风时、风向组合作用下，苔藓的盖度与砂子的质量损失量之间存在线性负相关关系，且相关系数均大于 0.93，表明相关性很好。由此可见，苔藓能有效的提高黄土坡面的抗风蚀能力。拟合苔藓盖度与标准砂的侵蚀模量的关系曲线如图 3。由图 3 可知，侵蚀模量与苔藓的盖度成线性负相关，相关系数等于 0.989，相关性很大。可见苔藓在提高黄土坡面的抗风蚀能力方面贡献很大。

105

苔藓植物常呈大片垫丛状生长<sup>[18]</sup>，植株之间常存在很多空隙，所以苔藓植物有很强的保水能力<sup>[18]</sup>。降水必须先使苔藓饱和才能透过苔藓下渗到土壤中侵蚀土壤，但是没有苔藓覆盖的黄土坡面在降雨时直接受到雨水的冲刷和打落，所以其受到侵蚀的速度和程度都必定比有苔藓覆盖的坡面受到侵蚀的速度更快，程度更深。其次，苔藓密布丛生，植株松软，刚度很低，苔藓植株对雨滴具有消耗能量的作用，从而有效的降低了雨水对坡面的侵蚀。苔藓结皮能有效的提高黄土坡面的硬度，而没有苔藓的坡面表层土壤疏松，在风力较低时细小的颗粒就会被吹走，在降雨较小时坡面就会出现细小的冲沟，所以苔藓植物对提高黄土坡面的抗风蚀、雨蚀能力有深刻的作用。

110



115

图 3 苔藓盖度与侵蚀模量的关系

Fig.3 The relationship between Moss coverage and erosion modulus

## 2 强度实验

120 为了研究苔藓生在对黄土的物理力学性质的影响, 选择有代表性的坡面制取有代表性的原状土样进行直接快剪试验, 并取适量的扰动土测定其粒径分布特征、密度、比重、液塑限等物理性质。

制取三组有代表性的环刀式样, 分别为无苔藓的空白样组、苔藓稀疏的式样组、苔藓密集的式样组, 每个式样组取 4 个式样, 分别在 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 的垂直压力下用直剪仪进行直接快剪试验, 做出抗剪强度  $\tau$  与正应力  $\sigma$  的关系曲线如图四。

125 取适量的扰动土样进行物理指标的测定, 结果见表 4。对于有苔藓的两组式样, 在取土时将整块苔藓挖起, 用切土刀刮取苔藓根部的土, 将苔藓放回原处, 回填适量的土壤并浇适量的水, 保证苔藓能存活。

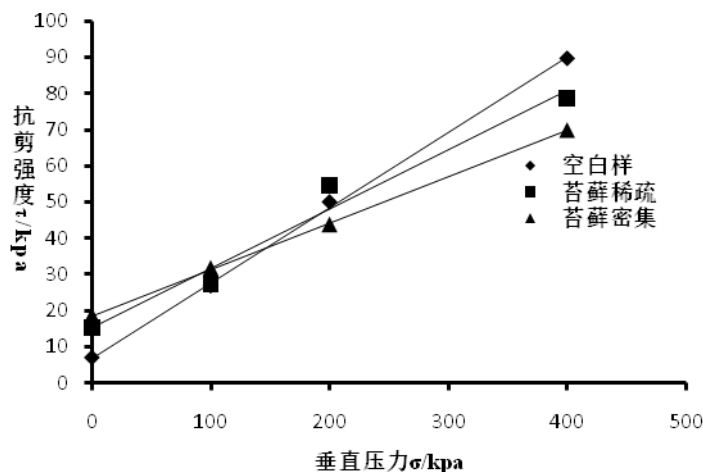


图 4: 不同苔藓盖度的黄土坡面的抗剪强度

Fig 4 Loess shear strength of different moss coverage

130

由图 4 可知, 苔藓能有效的提高黄土的抗剪强度, 有苔藓覆盖的黄土, 其内聚力明显提高, 且苔藓盖度越大, 内聚力越大。对比三条曲线可以发现, 苔藓越密集, 黄土的摩擦角降

低。

表 4 各个实验组的物理指标

135

Table 4 Physical indicators for each experimental group

实验组	密度 g/cm <sup>3</sup>	干密度 g/cm <sup>3</sup>	相对 密度	粒径小于 0.075mm 含量	粒径小于 0.005mm 含量	孔隙比
空白样组	1.64	1.53	2.73	53.12%	6.9%	0.78
苔藓稀疏样组	1.48	1.38	2.65	57.73%	8.5%	0.92
苔藓密集样组	1.44	1.34	2.65	65.00%	10.7%	0.98

140

内聚力的增大与黄土粘粒和粉粒含量关系密切。黄土属于粉质粘土，土粒结构属于蜂窝状结构，粉粒粒间联结作用弱，但是土中的粘粒形成薄膜，对粉粒起胶结作用，对土的颗粒骨架起支撑作用。粘粒具有胶体的性质，其表面活性强、表面能大、吸附能力强、表面带电，粘粒之间的相互作用形成了黄土的原始内聚力。由表 4 可知随着苔藓密度增大，土中细颗粒含量增多，粘粒含量也增大，所以黄土的内聚力必然增大。

黄土的内摩擦角的大小与黄土颗粒的大小以及颗粒之间的咬合作用关系密切。颗粒越粗，或者粗颗粒的含量越高，则内摩擦角越大。由表 4 可知，没有苔藓的空白实验组粗颗粒含量最高，所以其内摩擦角最大。

145

随着苔藓密度增大，各实验组黄土的密度、干密度、相对密度在减小，孔隙比在增大，可见苔藓的生命活动能降低黄土的密实度，除了使黄土中的细颗粒含量增多，还能使其有机质含量增多。由于苔藓的生命活动使黄土朝着有机质土的方向演化，所以在苔藓生在的坡面上会生长出一些生命力较顽强的植物，如草本植物，这些植物的根通常生长较深且须根发育较好，这些须根的加筋作用也能提高黄土的内聚力。

### 3 结论

150

(1) 通过对黄土苔藓坡面模拟风蚀和雨蚀实验，发现苔藓植物在提高黄土坡面的抗风蚀、抗雨蚀能方面作用效果显著，且这种作用效果与苔藓的盖度密切相关。苔藓的盖度越大，这种作用效果越明显，当苔藓盖度达到 40% 以后，抗风蚀能力可提高 2-3 倍，抗雨蚀能力可提高 3-4 倍。由此可见，在干旱半干旱的黄土高原地区，苔藓植物在保持水土、改善生态方面起到了不可替代的作用。

155

(2) 通过对苔藓植株下浅表层土壤进行抗剪强度实验发现：苔藓植物能提高黄土的抗剪强度，主要是通过增大黄土的内聚力来实现，且苔藓的盖度越高，内聚力越大。黄土内聚力的提高与黄土中粘粒所占比重密切相关，苔藓植物的生长活动能提高黄土的粘粒含量，从而提高了黄土的抗剪强度。

#### [参考文献] (References)

160

[1] 程积民, 万惠鹅, 王静. 黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究[J]. 草地学报, 2003, 11 (4) : 296-300

[2] 樊军, 邵明安, 王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. 草地学报, 2006, 14 (3) : 261-264

[3] 陈政, 贵阳德, 孙庆业. 生物结皮对铜尾矿废弃地土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20 (9) : 2193-2198

165

[4] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯. 冲刷条件下坡面水流速与产沙关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41 (6) : 876-880

[5] 赵允格, 许明祥, 王全九. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状处报[J]. 应用生态学, 2006, 17 (8) : 1429-1434

[6] 赵允格, 许明祥, 王全九. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21 (3) : 441-448

170

[7] 李红卫, 任天瑞, 周志彬. 新疆古尔班通古特沙漠生物结皮的土壤理化性质分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27 (4) : 619-626

- [8] 赵哈林, 郭轶瑞, 周理莲. 植物覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20 (7) : 1657-1663
- 175 [9] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22 (9) : 2259-2264
- [10] DL Jeffries, SO Link, JM Klopatek. CO<sub>2</sub> fluxes of cryptogamic crusts. I. Response to dehydration[J]. New Phytologist, 1993, 125(1):163-173
- [11] OL Lang. Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: Field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert[J]. Functional Ecology, 1994, 18(8):253-264
- 180 [12] OL Lang, J Belnap, H Reichenberger. Photosynthesis of the cyanobacterial soil-crust lichen *Collema tenax* from arid lands in southern Utah, USA: Role of water content on light and temperature responses of CO<sub>2</sub> exchange[J]. Functional Ecology, 1998, 12(2): 195-202
- [13] MA Bowker, J Belnap, VB Chaudhary. Revisiting classic water erosion models in drylands: The strong impact of biological soil crusts[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9):2309-2316
- 185 [14] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 张国秀. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可侵蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (1) : 105-112
- [15] J Belnap, OL Lang. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin: Springer Verlag, 2003
- [16] 卫伟, 温智, 陈利顶, 吴东平. 半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应[J]. 环境科学, 2012, 33 (11) : 3901-3904
- 190 [17] 张会, 杜桂森. 苔藓植物分子系统学研究进展[J]. 首都师范大学学报, 2002, (2) : 57
- [18] 彭琴, 杜桂森. 苔藓植物的特性及人工培养方法[J]. 九江学院学报, 2007, (6) : 72-92
- [19] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [20] 孙俊峰. 苔藓植物繁殖栽培方法及其专类园的价值[J]. 现代园林, 2013, 10 (11) : 63-68