

黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响

高丽倩^{1,3}, 赵允格^{1,2*}, 秦宁强², 张国秀², 杨凯²

- (1. 中国科学院、水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 生物结皮在干旱、半干旱地区广泛发育。迄今, 有关生物结皮发育过程中土壤物理属性的响应仍不明确。论文采用野外调查与室内分析相结合的方法, 定量研究不同生物量生物结皮对土壤物理属性的影响。结果表明: ①生物结皮的发育能够细化土壤, 当生物结皮由初期藻结皮演替至 60%~80% 苔藓结皮时(5 等级), 生物结皮层粗砂粒含量降低了 86%; ②随着生物结皮生物量的增加, 生物结皮层土壤容重和硬度较初期分别降低了 15% 和 68%, 田间持水量和孔隙度分别增加了 36% 和 14%; 生物结皮层粘聚力是下层土壤的 6~7 倍; ③生物结皮的发育对土壤物理属性的影响与生物量有关, 当苔藓生物量达 $2.91 \pm 0.12 \text{ g/dm}^2$ 时, 其土壤物理属性基本稳定。研究结果为揭示生物结皮抗侵蚀机理提供了科学参考。

关键词: 生物结皮; 生物量; 发育过程; 土壤物理属性; 黄土丘陵区

中图分类号: S154.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2012)08-1316-11

生物结皮(生物土壤结皮)是指由不同种类的苔藓、地衣、藻类、地钱、真菌、蓝藻以及细菌等生物组成与其下层很薄的土壤共同形成的一个复合的生物土壤层,是干旱、半干旱地区普遍存在的地被物^[1]。近 20 a 来,随着人们对干旱半干旱生态系统的关注以及对生物结皮研究的深入,国内外相继出现了大量有关生物结皮分布、对土壤理化性质的影响及其水土保持功能的研究,取得了许多有益的成果。如 Eldridge 研究了澳大利亚东南部草地生物结皮的发展动态,发现生物结皮占据了大部分无植被区域^[2]。Harper 和 Belnap 等证实生物结皮是荒漠生态系统中重要的土壤氮源^[3-4],生物结皮的形成可显著增加表层土壤氮含量,并呈现一定的表聚现象^[5-6]。Jeffries、Lange、赵允格以及张元明等研究了生物结皮的光合固碳作用,证实生物结皮的形成显著增加了表层土壤有机质含量^[7-11]。此外,还有一些研究发现,生物结皮的发育能够降低 pH 值,提高速效养分、全量养分含量^[5-6,12]。

纵观前人的研究,可见目前有关生物结皮对土壤理化属性的影响,多针对于土壤化学属性展开,而针对土壤物理属性影响的研究则薄弱,虽然已有研究表明生物结皮的形成对土壤物理属性亦有影响,如肖波^[5]等在黄土高原地区的研究表明沙土生物结皮层的粘粒、粉

收稿日期: 2011-12-26; 修订日期: 2012-03-11。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40971174); 中科院“西部之光”人才培养计划项目。

第一作者简介: 高丽倩(1986-),女,河北石家庄人,硕士,研究方向为生物土壤结皮生态功能。E-mail: gaoliqian1986@yahoo.com.cn

* 通信作者简介: 赵允格(1971-),女,陕西咸阳人,博士,研究员,主要从事生物土壤结皮及土壤水分、养分运移方面的研究工作。E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

致谢: 作者感谢中国科学院安塞水土保持综合试验站对本文的大力支持,感谢中国科学院水土保持研究所许明祥副研究员对本研究工作的鼎力帮助。

粒含量明显高于流沙,王蕊等也有类似研究报道^[13],赵允格等研究证实生物结皮的形成增加了表层土壤的粘结力。而有关土壤物理属性与生物结皮的发育过程或程度的内在关系仍不明确。目前国内许多学者的研究表明,生物结皮的发育能够显著降低坡面土壤流失量^[5,14-15],但生物结皮对坡面水土流失的影响机理尚不明确,其原因之一可能就在于生物结皮的形成与土壤物理属性(如粘结力、孔性、容重及颗粒组成之间的关系)仍不明确。

位于干旱半干旱气候区的黄土高原丘陵区,自然环境十分脆弱,严重的土壤侵蚀和频繁的干旱并存是其重要特征。近年来,为了有效防治水土流失,实现生态系统良性循环,黄土高原地区开始大面积实施退耕还林(草)措施,为生物结皮的形成和发育提供了有利条件。据调查,黄土丘陵区生物结皮盖度可达70%以上,与高等植被共同覆盖地表^[6]。本文通过野外调查和室内分析相结合的方法,定量研究不同生物量生物结皮的发育过程对土壤物理属性的影响,以期揭示生物结皮土壤的抗侵蚀机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验主要在中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场内进行。该站位于陕西省安塞县,地理坐标为109°18'E,36°51'N,属典型的黄土丘陵沟壑区,气候区划上属暖温带半干旱季风气候。平均海拔1200 m,相对高差100~300 m,年均气温8.8℃,多年平均降水量505 mm。年日照2300~2400 h, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为3282℃,干燥度指数 $K=1.48$,无霜期157 d,降水年度分配不均,7—9月降水量占年降水量的60%左右,且多暴雨。

地带性土壤为黑垆土,由于严重的水土流失,黑垆土损失殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥形土)为主。植被区划上,属于森林草原的南部边缘,地带性植被为暖温性灌草丛和草甸草原群落,其分布规律为:在阳坡和半阳坡,主要分布着芨芨(*Artemisia giraldii* Pamp)和长芒草(*Stipa bungeana* Trin),白羊草(*Bothriochloa ischaemun* (L.) Keng)和芨芨群落,白羊草+达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl)群落,长芒草+达乌里胡枝子群落等;在阴坡和半阴坡,主要分布着铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)和芨芨群落,虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne)群落,沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)群落。此外还有小片的紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、绣线菊(*Spiraea* sp.)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam)群落等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

以研究区不同年限的退耕撂荒坡地为研究对象,结合生物结皮的生物量,选取人为扰动少、生物结皮相对完整的退耕地作为研究样地,每样地设3~4个重复,各样地基本情况见表1。

生物结皮覆盖度调查:每个样地用25样点法(25 cm×25 cm小样方)以样地形状按照梅花状或之字状布设10个样方调查生物结皮种类及盖度,记录样方中苔藓、地衣、藻、裸土、小石砾、高等植物、植物枯落物的出现频率,以各类物种在调查总点数的百分数计算其相应的覆盖度。同时记录采样区海拔、坡度、坡向、植被状况及土壤侵蚀状况等立地条件。调查结束后,在每个样地选取5点分别采取生物结皮层及其下伏土壤0~2 cm,2~5 cm,5~10 cm的土壤样品,并同层混合作为一个分析样。采样时,选取高等植被间的空地,避免植被根系影响。研究以同区域农耕地作为对照。样地概况见表1。

表 1 调查样地概况

Table 1 Characteristics of the sampling plots

样地	退耕年限/a	坡度/(°)	坡向	植被盖度/%	生物结皮盖度/%	苔藓*	
						生物量/(g/dm ²)	等级
F19	3	0	/	40	89	0(藻结皮)	1
F9	6	18	东	80	83	1.63	2
F22	5	0	/	45	89	1.75	2
F13	17	3	北	47	86	1.77	2
F23	18	15	东	32	94	2.45	3
F20	30	25	东偏北 45°	67	90	2.91	3
F21	28	25	东偏北 45°	53	88	3.08	3
F8	8	15	东	65	88	3.22	4
F5	12	20	西	75	86	3.38	4
F12	20	7	西	70	71	3.41	4
F6	16	5	北	40	80	4.40	5
F16	30	3	北	69	81	4.46	5
F11	15	17	北	59	74	8.84	6

注:调查样地类型均为梁坡地,海拔在 1 200 m 左右;主要的植被类型为铁杆蒿、达乌里胡枝子、茵陈蒿(*Artemisia capillaris* Thunb)、长芒草、柳枝稷(*Panicum virgatum* Linn)、狗尾草(*Setaria viridis*(Linn.) Beauv)。* 等级划分原则:生物量以单位面积苔藓重量来表征(g/dm²)。等级划分以苔藓植物覆盖度(%)及生物量为标准:1 等级苔藓植物覆盖度为 0,即藻结皮;2 等级苔藓植物覆盖度为 10%~30%,生物量 1.71 ± 0.05 g/dm²;3 等级苔藓植物覆盖度 30%~50%,生物量 2.91 ± 0.12 g/dm²;4 等级苔藓植物覆盖度 50%~60%,生物量 3.31 ± 0.05 g/dm²;5 等级苔藓植物覆盖度 60%~80%,生物量 4.31 ± 0.12 g/dm²;6 等级苔藓植物覆盖度 >80%,生物量 8.84 ± 0.27 g/dm²。

1.2.2 测定项目及方法

(1) 田间持水量:针对土壤生物结皮的特殊性,采用改进了的土壤田间持水量的测定方法。将原状生物结皮放在孔径 1 mm 的具孔小筛上,再将放有结皮的小筛放入盛薄层水的托盘内,使结皮充分饱和后,取出并放在三层定性滤纸上,让滤纸与具孔小筛底部充分接触吸水,准确吸水 3 min,然后称量结皮湿重。之后,将生物结皮烘干至恒重后称干重,计算含水量,即得到相对田间持水量。

(2) 容重:生物结皮层容重采用涂膜法^[16],生物结皮层下土壤容重采用环刀法测定。

(3) 颗粒组成:马尔文 MS2000 激光粒度分析仪。由于生物结皮有机质含量较高,为了充分分散土壤颗粒,对样品进行如下前处理:先后采用 10% 和 30% 的过氧化氢(H₂O₂)浸泡,去除有机质,然后采用 0.2 mol/L 的 HCl 溶液浸泡以洗去土壤中的碳酸盐,再用 0.05 mol/L 的 HCl 浸泡土壤样品至无气泡为止^[17],处理完毕后上机测定。

(4) 土壤粘聚力:用土壤剪切力仪分别测定保留结皮层和去除结皮层的土壤粘聚力^[18-19],各重复测定 20 次,去除极大值和极小值后取平均值(单位:kg/cm²)。

(5) 土壤硬度:用硬度计分别测定保留结皮层和去除结皮层的土壤硬度,各重复测定 20 次,去除极大值和极小值后取平均值(单位:kg/cm²)。

(6) 孔隙度:土壤孔隙度 = $\left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{相对密度}}\right) \times 100\%$ (土壤密度取 2.65 g/cm³)。

(7) 生物结皮生物量测定:测定苔藓类结皮生物量。将风干后遮光保存的苔藓结皮用水喷湿,使其脱离休眠状态,然后用打孔器取一定面积(0.95 cm²)的苔藓结皮样放入网筛中冲洗,收集苔藓植物放到称量瓶,于烘箱中 85 °C 杀青 30 min 后 65 °C 烘干至恒重后称重,计

算出单位面积苔藓植物生物量(g/dm^2)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 与 SPSS 16.0 统计分析软件相结合进行数据处理及统计分析。对各个土壤物理属性指标不同生物量所对应的数据以及生物结皮层和下层土壤所对应的数据进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果分析

2.1 生物结皮的发育对土壤颗粒组成的影响

颗粒组成是土壤基本物理属性之一,可以评价土壤的结构性,是影响土壤抗侵蚀性的重要因素。有研究表明,生物结皮的形成可通过低等生物的胞外分泌物粘结、捕获空气中的细颗粒以及生物风化等作用改变表层土壤颗粒组成^[1]。

研究区不同生物量生物结皮及下层(0~2 cm)土壤粒级分布如图 1 所示,从图 1 可见,对生物结皮层而言,各生物量的生物结皮层土壤的颗粒组成以粗粉粒(0.01~0.05 mm)和细砂粒(0.05~0.25 mm)为主,占到所有颗粒组分的 80% 左右,粘粒(<0.002 mm)、细粉粒(0.002~0.01 mm)和粗砂粒(0.25~1 mm)仅占 20%。由图 1(a)和表 2 可见,当生物结皮生物量由 1 等级增加至 5 等级时,土壤粗砂粒含量降低了 86%,细砂粒含量增加了 45%,粗粉粒、细粉粒和粘粒的变化不明显。另外,对比生物结皮层[图 1(a)]与其下 0~2 cm 土壤[图 1(b)]颗粒组成,可见 0~2 cm 土壤的粗砂粒比生物结皮层低 1% 左右,而生物结皮层土壤的细粉粒含量则比 0~2 cm 土壤高 3% 左右。表明生物结皮的形成在一定程度上细化了土壤颗粒。

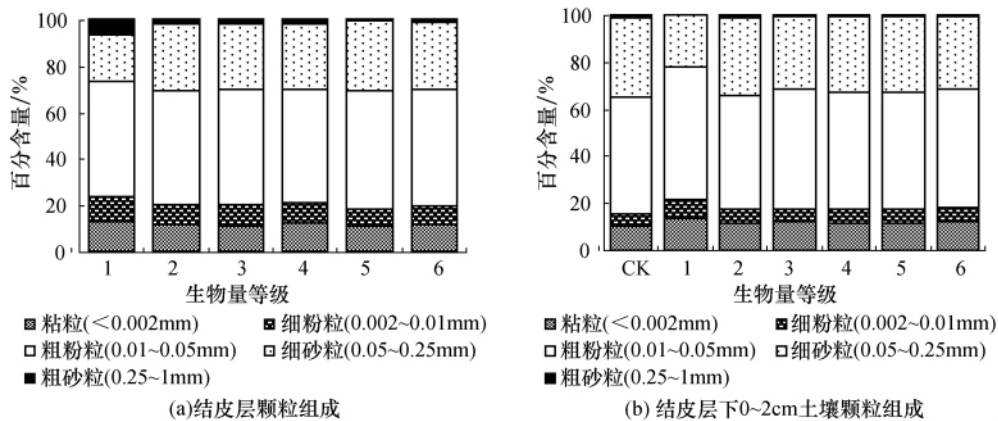


图 1 不同生物量生物结皮土壤颗粒组成

Fig. 1 Soil particle composition of bio crusts with variable biomass

表 2 生物结皮层土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle composition of bio crusts

(%)

生物量等级	粘粒	细粉粒	粗粉粒	细砂粒	粗砂粒
1	12.94	10.71	49.75	19.92	6.67
3	11.06	8.94	49.98	27.75	2.26
5	10.68	7.65	50.92	29.81	0.94

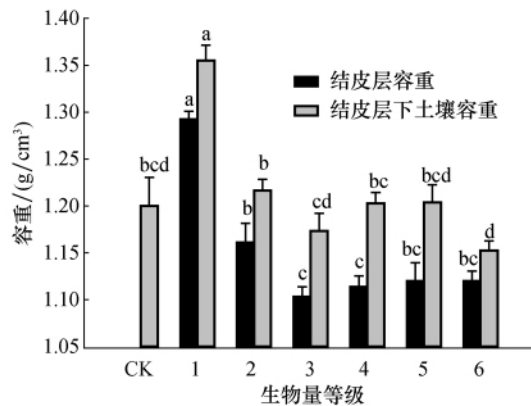
2.2 生物结皮的发育对土壤容重的影响

土壤容重是土壤紧实度的一个指标,主要受土壤密度、空隙以及有机质含量等的影响,这些因素都能够影响土壤抗侵蚀性,因此土壤容重与土壤抗侵蚀性能密切相关。生物结皮的形成可能影响了土壤孔隙度以及有机质含量,进而影响土壤容重。研究区土壤容重随生物结皮生物量的变化情况见图2。由图2可见,随着生物结皮生物量的增加,生物结皮层容重显著降低。生物结皮发育初期(1等级生物量)生物结皮容重为 1.29 g/cm^3 ;随着生物结皮生物量的增加,生物结皮层容重下降,特别是2、3等级,容重由 1.16 g/cm^3 降至 1.10 g/cm^3 ,较发育初期藻结皮(1等级)降低了15%。这可能与此期间结皮生物(主要为苔藓植物)的迁入繁殖有关,其后随着生物结皮生物量的增加,土壤容重逐渐趋于稳定。

对比生物结皮层及其下层土壤的容重可见,生物结皮层容重显著低于其下层土壤,且下层土壤容重的变化趋势与生物结皮层一致。表明不同生物量的生物结皮不仅显著降低了其本身容重,并且也影响到了下层土壤容重。

2.3 生物结皮对土壤田间持水量的影响

土壤田间持水量是反映土壤保水能力大小的一个指标。图3为土壤田间持水量随生物结皮生物量的变化情况。可见田间持水量随生物结皮生物量的增加显著增加。生物结皮生物量为1等级时,田间持水量为42%,比耕地(37%)增加了14%,但是差异不显著。当生物量达到2等级时,生物结皮层田间持水量增加至48%,显著高于耕地。当生物量达3等级时,生物结皮层田间持水量增加至57%,高出耕地约54%,较发育初期藻结皮增加了36%,之后基本趋于稳定。表明生物结皮在发育过程中显著增加了土壤田间持水量,增加了土壤的持水性能。



注:图中不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图2 土壤容重随生物结皮发育的变化

Fig. 2 Soil bulk density of variable biomass of biocrusts

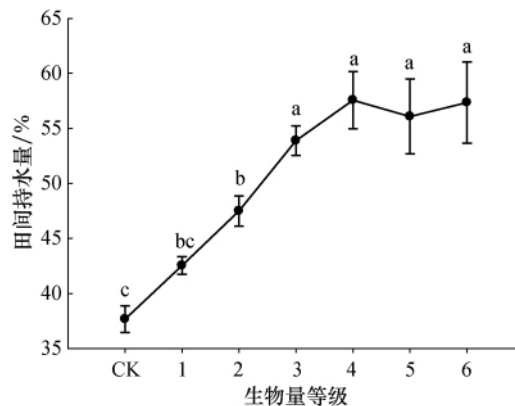


图3 土壤田间持水量随结皮生物量的变化

Fig. 3 Changes of field water holding capacity against biomass increase of biocrusts

2.4 生物结皮对土壤孔隙度的影响

土壤孔隙度与土壤持水性及通气性紧密相关,能够反映土壤孔隙状况和松紧程度,在一定程度上影响土壤抗侵蚀性。图4是研究区不同生物量生物结皮与下层土壤的孔隙度情况,可见随着生物结皮生物量增加,生物结皮层孔隙度显著增加。生物结皮发育初期,孔隙度较低,仅为51%,显著低于耕地土壤孔隙度(56%)。当生物量增加至3等级时,孔隙度随

之增加至 58% ,显著高于耕地 ,其后孔隙度无显著增加。与下层土壤对比可见 ,生物结皮层孔隙度显著高于下层土壤 ,并且与下层土壤孔隙度变化趋势一致。当生物量达到 3 等级时 ,下层土壤孔隙度达到 55% 较发育初期藻结皮增加了 14% 并趋于稳定。表明生物结皮在发育过程中显著增加了土壤孔隙度。

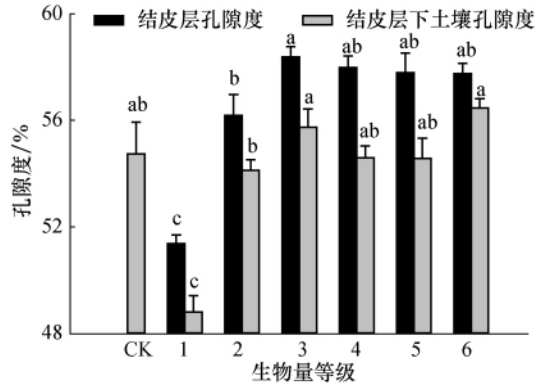


图 4 生物结皮的发育对土壤孔隙度的影响

Fig. 4 Influence of biocrusts with variable biomass on soil porosity

2.5 生物结皮对土壤粘结力的影响

土壤粘结力是土壤颗粒之间相互作用、胶结的能力 ,是土壤抗侵蚀性的量度指标。由于生物结皮的出现 ,结皮微生物及其分泌物对土壤颗粒的粘结、捆绑作用使土壤粘结力得以显著增强。图 5 (a) 是研究区土壤粘结力随生物结皮生物量的变化情况。可见生物结皮土壤粘结力随着生物结皮生物量的增加而增加。土壤粘结力在生物结皮发育早期由 0.60 kg/cm^2 增加到 0.72 kg/cm^2 ,增加幅度较大 ,后期变化不明显。与下层土壤相比 ,生物结皮层土壤粘结力是下层土壤的 6 ~ 7 倍。下层土壤粘结力基本处于 0.10 kg/cm^2 左右 ,无明显变化。即生物结皮的发育显著增加了土壤粘结力 ,从而增强土壤抗侵蚀性。

2.6 生物结皮对土壤硬度的影响

土壤硬度又称坚实度、穿透阻力 ,影响着土壤的水、肥、气、热状况 ,与土壤抗侵蚀性密切相关。研究区土壤硬度随生物结皮发育的变化情况如图 5 (b) 所示 ,随着生物结皮生物

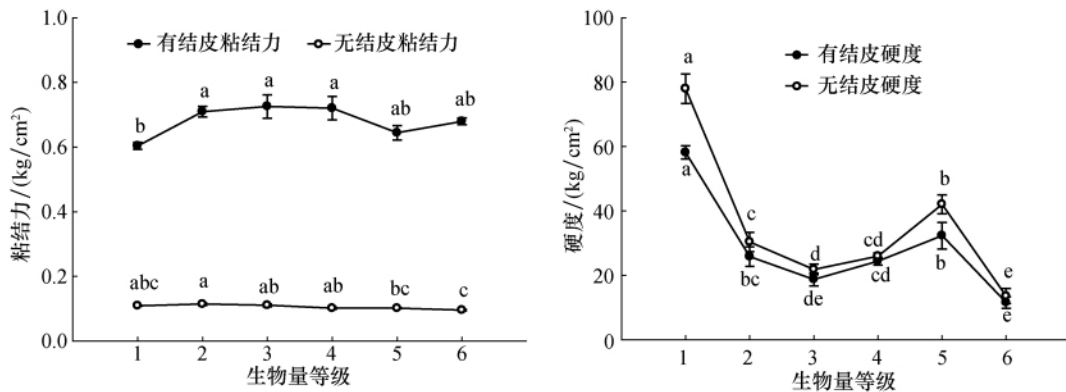


图 5 生物结皮的发育对 (a) 土壤粘结力和 (b) 土壤硬度的影响

Fig. 5 Influence of biocrusts with variable biomass on (a) soil cohesion and (b) soil hardness

量的增加,土壤硬度显著降低。生物结皮发育早期(1 等级)土壤硬度为 58.15 kg/cm^2 ,当生物量增加至 2 等级,土壤硬度降低至 25.83 kg/cm^2 ,尚不足 1 等级的 $1/2$ 。直到 3 等级,土壤硬度为 18.76 kg/cm^2 比 1 等级降低了 68%。此后,当生物结皮生物量增加至 4 等级(24.40 kg/cm^2)、5 等级(32.35 kg/cm^2)时,土壤硬度又有所升高,到 6 等级(11.58 kg/cm^2)又开始降低。这可能与土壤退耕时的硬度、环境等各方面的影响有关。但是总体来看,土壤硬度随生物结皮生物量的增加而呈降低趋势。与下层土壤对比,生物结皮层土壤硬度小于下层土壤,但随生物结皮生物量的变化与下层土壤硬度基本一致。表明,生物结皮的发育过程有降低生物结皮层土壤硬度的效应,3 等级后土壤硬度变化不明显。

3 讨论

3.1 土壤颗粒组成对生物结皮发育的响应

生物结皮在干旱、半干旱生态系统中占有重要位置。目前,人们对生物结皮的发育能够改善土壤状况已经基本形成共识,但是不同学者因研究土壤类型的差异得出的结论也不尽相同。来自沙区的研究资料表明,生物结皮的发育能够粘化土壤^[5],颗粒组成中粗粉砂、粘粒和粉粒含量呈明显增加趋势^[20-21]。本研究在黄土区展开,该区土壤质地较沙土粘重,与沙土有本质的区别。本研究结果表明生物结皮层的土壤颗粒组成以粗粉粒和细砂粒为主,朱清科、卜楠、王蕊等对黄土丘陵区生物结皮颗粒组成进行了研究,也得到类似结果^[13-22]。

本研究发现生物结皮层的砂粒含量高于其下 0~2 cm 土壤,但是随着结皮的发育,砂粒含量呈减少趋势。这可能由于研究区较大的降雨量(年均降雨量为 505 mm),且较集中,导致生物结皮形成前与发育初期,土壤细颗粒在纵向和横向两个方向迁移,而较大的砂粒则留在了表层,从而导致结皮层的砂粒含量高于其下层土壤。另外,生物结皮能够分泌胞外多聚糖,对土壤颗粒有一定的粘结固定作用^[1,14]。因此,随着生物结皮的发育,土壤细颗粒被固定,减少了细颗粒的流失量,细颗粒含量相对增加,粗砂粒含量相对减少。具体原因还有待进一步研究。

3.2 土壤田间持水量对生物结皮发育的响应

土壤田间持水量是毛管悬着水达最大量时的土壤含水量,它是反映土壤保水能力大小的一个指标。传统的土壤田间持水量的室内测定方法为环刀法,由于生物结皮厚度较小,本研究针对其特殊性对环刀法测定土壤田间持水量进行改进。将原状结皮放在小筛上充分饱和,然后放在三层定性滤纸上让其充分接触吸水,3 min 后称结皮湿重,烘干至恒重后称干重,计算得到相对田间持水量。赵允格等^[23]在研究生物结皮固氮潜力,设定含水量时也采用该试验方法。由于试验条件不同,受各种因素影响,本研究采用该方法之前反复进行预实验后发现,三层定性滤纸就可以满足条件,并且 3 min 后水分含量就已经达到稳定。虽然该方法所测定结果可能与实际田间持水量有偏差,但是测定数据已能够反映不同生物组成及发育阶段的生物结皮水分吸持能力的差异及变化情况。此外,肖波等研究发现黄土结皮能显著增加土壤田间持水量的结果^[5]与本研究结果基本一致,从侧面证实了本研究结果的可靠性。

3.3 生物结皮的发育对土壤物理属性的影响及其与土壤抗侵蚀性的关系

本研究结果表明,生物结皮的形成显著影响了土壤容重、土壤粘结力、颗粒组成、土壤孔隙度、田间持水量、土壤硬度等土壤物理属性,研究区各土壤物理属性概况及变异性如表 3 所示,除硬度整体变异性表现为中等变异外,其余指标均为弱变异。此外,已有许多研究表明,以上物理属性与土壤抗侵蚀性密切相关。如冉茂勇和赵允格等通过对黄土丘陵区

生物结皮土壤抗冲性的研究发现,土壤侵蚀率与生物结皮有机质含量、粘结力呈负相关,与容重呈正相关^[24]。也有研究发现土壤颗粒级配越好,粘粒含量越多,土壤的抗剪强度越大^[25]。土壤抗侵蚀性与土壤物理属性和外在生物因素关系较大^[26-28]。本文的研究结果从土壤物理属性角度,揭示了生物结皮在发育过程中增强土壤抗侵蚀性的可能的内在原因,为揭示生物结皮土壤抗侵蚀机理提供了科学依据。

表3 研究区土壤物理属性变异性 C_v

Table 3 Coefficient of variation of soil physical properties in study area

生物量	粘结力/%		硬度/%		容重/%		孔隙度/%		田间持水量/%
	有结皮	无结皮	有结皮	无结皮	结皮层	下层土壤	结皮层	下层土壤	
CK	—	—	—	—	—	4.41	—	3.81	5.58
1	3.54	2.63	6.98	10.31	1.32	2.45	1.28	2.53	3.76
2	6.88	10.24	34.97	29.33	5.33	2.88	4.13	2.24	8.71
3	15.07	12.35	32.10	22.29	2.83	4.76	1.98	3.69	7.43
4	15.94	12.32	15.21	11.97	3.28	3.01	2.36	2.58	14.31
5	7.80	2.35	25.43	13.83	3.89	3.45	2.84	3.11	13.60
6	3.17	5.14	30.99	34.68	1.93	1.79	1.33	1.23	12.89

4 小结

本文研究了黄土丘陵区不同生物量生物结皮对土壤物理属性的影响,主要取得以下结论:

(1) 生物结皮的发育对土壤具有一定的细化作用。生物结皮层土壤颗粒组成以粗粉粒和细砂粒为主,占到所有颗粒组分的80%左右。当生物结皮生物量等级由1等级增加至5等级时,土壤粗砂粒含量降低了86%,细砂粒含量增加了45%;并且生物结皮层细粉粒含量比生物结皮层下土壤高3%,但砂粒含量比下层0~2 cm土壤高1%,随着生物结皮的发育,生物结皮层砂粒含量降低。

(2) 生物结皮的发育能够显著降低土壤容重和硬度,增加土壤田间持水量、土壤孔隙度和粘结力。随着生物结皮生物量的增加,生物结皮层土壤容重较初期藻结皮降低了15%;土壤硬度在生物结皮发育后期较初期降低了68%;土壤田间持水量后期较初期增加了36%,高出耕地约54%;土壤孔隙度后期较早期藻结皮增加了14%;生物结皮层土壤粘结力是下层土壤的6~7倍。

(3) 生物结皮对土壤物理属性的影响与生物量有关,并且当生物结皮中苔藓覆盖度为30%~50%,生物量达 $2.91 \pm 0.12 \text{ g/dm}^2$ (3等级)时,各物理属性基本趋于稳定。

(4) 生物结皮层土壤容重、孔隙度、硬度以及粘结力与下层0~2 cm变化趋势一致,说明生物结皮的发育不仅对其本身土壤物理属性有影响,也影响至其下层0~2 cm的土壤。

以上研究结果为揭示生物结皮土壤抗侵蚀机理提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crust: Structure, Function, and Management [M]. Berlin Heidelberg, 2003.
- [2] Eldridge D J. Dynamics of cryptogamic soil crusts in a derived grassland in southeastern Australia [J]. *Austral Ecology*, 2000, 25: 232-240.
- [3] Harper K T, Pendleton R L. Cyanobacteria and cyanolichens: Can they enhance availability of essential minerals for higher

- plants [J]. *Great Basin Naturalist*, 1993, 53: 59-72.
- [4] Belnap J. Soil surface disturbances in cold deserts: Effects on nitrogenase activity in cyanobacterial-lichen soil crusts [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23: 362-367.
- [5] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670. [XIAO Bo, ZHAO Yun-ge, SHAO Ming-an. Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4662-4670.]
- [6] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 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. [ZHAO Yun-ge, XU Ming-xiang, WANG Quan-jiu, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441-448.]
- [7] Lange O L. Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: Field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert [J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(2): 253-264.
- [8] Jeffries D L, Link S O, Klopatek J M. CO₂ fluxes of cryptogamic crusts I. Response to resaturation [J]. *New Phytologist*, 1993, 125(1): 163-173.
- [9] 赵允格, 许明祥, Belnap J. 生物结皮光合作用对光温水的响应及其对结皮空间分布格局的解译——以黄土丘陵区为例[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4668-4675. [ZHAO Yun-ge, XU Ming-xiang, Belnap J. Response of biocrusts photosynthesis to environmental factors: A possible explanation of the spatial distribution of biocrusts in the hilly Loess Plateau region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4668-4675.]
- [10] Lange O L, Belnap J, Reichenberger H. Photosynthesis of the cyanobacterial soil crust lichen *Collema tenax* for arid lands in southern Utah, USA: Role of water content on light and temperature response of CO₂ exchange [J]. *Functional Ecology*, 1998, 12: 195-202.
- [11] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 等. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3420-3425. [ZHANG Yuan-ming, YANG Wei-kang, WANG Xue-qin, et al. Influence of cryptogamic soil crusts on accumulation of soil organic matter in Gurban Tunggut Desert, northern Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3420-3425.]
- [12] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434. [ZHAO Yun-ge, XU Ming-xiang, WANG Quan-jiu, et al. Physical and chemical properties of soil biocrust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1429-1434.]
- [13] 王蕊, 朱清科, 卜楠, 等. 黄土丘陵沟壑区生物土壤结皮理化性质[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 401-408. [WANG Rui, ZHU Qing-ke, BU Nan, et al. Study on physicochemical properties of biological soil crusts in the hilly-gully regions of the Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 401-408.]
- [14] Bowker M A, Belnap J, Chaudhary V B, et al. Revisiting classic water erosion models in drylands: The strong impact of biological soil crusts [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2309-2316.
- [15] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 腾格里沙漠固定沙丘结皮层藓类植物的生态功能及与土壤环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 234-242. [XU Jie, BAI Xue-liang, TIAN Gui-quan, et al. Ecological function of mosses in biotic crusts on fixed dunes on Tengger desert and its relation with soil factor. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2): 234-242.]
- [16] 范文波, 李小娟. 涂膜法测定黄土结皮容重[J]. 山西水土保持科技, 2001(3): 9-10. [FAN Wen-bo, LI Xiao-juan. Determination the bulk density of biological soil crust by the method of coatings. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2001(3): 9-10.]
- [17] GB 7845—87. 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定[S]. [GB 7845 - 87. Determination of forest soil particle-size analysis (mechanical analysis).]
- [18] LIU Guo-bin, XU Ming-xiang, Coen R. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2003, 54: 31-44.
- [19] 许明祥, 刘国彬, 温仲明, 等. 黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(1):

- 21-23. [XU Ming-xiang, LIU Guo-bin, WEN Zhong-ming, *et al.* Temporal and spatial variation of soil characters in small catchment of loess hilly areas. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(1): 21-23.]
- [20] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变对水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 809-814. [XIAO Hong-lang, LI Xin-rong, DUAN Zheng-hu, *et al.* Impact of evolution of plant-soil system on the water environment during the mobile dunes stabilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 809-814.]
- [21] 崔燕, 吕贻忠, 李保国. 鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质[J]. 土壤, 2004, 36(2): 197-202. [CUI Yan, Lü Yi-zhong, LI Bao-guo. Physico-chemical properties of soil microbiotic crusts on Erdos Plateau. *Soil*, 2004, 36(2): 197-202.]
- [22] 卜楠. 陕北黄土区生物土壤结皮水土保持功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009. [BU Nan. Study on the Soil and Water Conservation Function of Microbilitic Soil Crusts on Loess Area of Northern Shaanxi Province. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.]
- [23] ZHAO Yun-ge, XU Ming-xiang, Belnap J. Potential nitrogen fixation activity of different aged biological soil crusts from rehabilitated grasslands of the hilly Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 1186-1191.
- [24] 冉茂勇, 赵允格, 陈彦芹. 黄土丘陵水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 37-40. [RAN Mao-yong, ZHAO Yun-ge, CHEN Yan-qin. Experimental study on the soil anti-scourability of biological crust in the water erosion region in loess hilly areas. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(3): 37-40.]
- [25] 逯海叶, 李平. 地表温度和土壤颗粒组成对抗剪强度的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2005, 26(1): 75-78. [LU Hai-ye, LI Ping. Effects of surface temperature and soil particle composition on sheer strength. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2005, 26(1): 75-78.]
- [26] 沈晶玉, 周心澄, 张伟华, 等. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 87-91. [SHEN Jing-yu, ZHOU Xin-cheng, ZHANG Wei-hua, *et al.* Effects of plant root system on the anti-scourability of soil in the south of Qilian Mountain. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(4): 87-91.]
- [27] 尹乐, 倪晋仁. 黄土丘陵区土壤抗水蚀能力变化的动态评估[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 724-734. [YIN Le, NI Jin-ren. Dynamic assessment of soil anti-erodibility by water in small water shed of loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 22(5): 724-734.]
- [28] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1982(3): 40-44. [ZHU Xian-mo. The main types and factors of water erosion in Loess Plateau of China. *Bulletin of Soil and Water Conseration*, 1982(3): 40-44.]

Impact of Biological Soil Crust on Soil Physical Properties in the Hilly Loess Plateau Region , China

GAO Li-qian^{1 3} , ZHAO Yun-ge^{1 2} , QIN Ning-qiang² , ZHANG Guo-xiu² , YANG Kai²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau , Institute of Soil and Water Conservation , CAS and MWR , Yangling 712100 , China; 2. Institute of Soil and Water Conservation , Northwest A & F University , Yangling 712100 , China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

Abstract: Biological soil crusts (biocrusts) are ubiquitous living surface covers in many arid and semi-arid regions. It has been demonstrated that the coverage of biocrusts was over 70% in the hilly Loess Plateau region of China and it played many important roles , such as exerting observably impact on soil properties and improving soil antierodibility. But the response of soil physical properties to the development of biocrusts has been unclear so far. The objective of the study was to determine the impact of development of biocrusts (i. e. with variable biomass) on soil physical properties in hilly Loess Plateau region. In this study , soil samples were collected after biocrusts and vegetation coverage survey , and the soil physical properties including soil bulk density , soil porosity , field water holding capacity , cohesion and hardness of biocrusts in different developmental stages were determined. The results showed: 1) Fine particles content increased due to the development of biocrusts. The content of coarse sand decreased by 86% while fine sand increased by 45% with biocrusts developing from cyanobacteria dominated to moss dominated (biomass of moss was $4.31 \pm 0.12 \text{ g/dm}^2$). 2) With the development of biocrusts , soil bulk density and hardness were reduced while field water holding capacity , soil porosity and cohesion were increased significantly. Along with the development of biocrusts , soil bulk density was dropped by 15%. Soil hardness of biocrusts in later development stage was reduced by 68% compared with the early stage. Field water holding capacity was increased to 57% , adding about 36% compared with the early stage , while soil porosity gone up to 58% , increasing by about 14%. Cohesion of biocrusts was 6 or 7 times as much as that of subsurface soil (0-2 cm) . 3) Impact of biocrusts on soil physical properties was closely related to biocrusts' biomass. When biomass of moss in biocrusts was to $2.91 \pm 0.12 \text{ g/dm}^2$, soil physical properties changed no longer significantly. 4) Soil physical properties not only in the layer of biocrusts , but also in the subsurface soil under the biocrusts were affected by the development of biocrusts. In conclusion , the results of our study suggested that soil physical properties were influenced by the development of biocrusts significantly. The study would likely provide scientific basis for the mechanism of soil antierodibility improvement by biocrusts.

Key words: biological soil crusts; biomass; development of biocrusts; soil physical properties; hilly Loess Plateau region