

# 黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性\*

张培培<sup>1,3</sup> 赵允格<sup>1,2,\*\*</sup> 王媛<sup>2</sup> 姚春竹<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 采用滴水穿透时间法和酒精溶液入渗法,研究了黄土高原丘陵区浅色藻结皮、深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮、藓结皮5种不同发育阶段的原状生物结皮土壤的斥水性及其与土壤含水量的关系。结果表明:生物结皮增加了土壤的斥水性,其斥水强度和持久性均显著增加。生物结皮土壤的斥水性随生物结皮的演替逐渐降低,当生物结皮中藓类植物盖度在20%以上时,斥水持久性显著低于藻结皮。生物结皮土壤的斥水性与土壤含水量及优势种密切相关,藓类生物结皮土壤的斥水性随着含水量的降低逐渐增加,藻类生物结皮土壤的斥水性随含水量的变化呈双峰曲线。

**关键词** 生物结皮 发育阶段 斥水性 土壤含水量

文章编号 1001-9332(2014)03-0657-07 中图分类号 S152.7 文献标识码 A

**Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China.** ZHANG Pei-pe<sup>1,3</sup>, ZHAO Yun-ge<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, YAO Chun-zhu<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(3): 657-663.

**Abstract:** By using water drop penetration time (WDPT) and molarity of ethanol droplet (MED) methods, the soil water repellence of undisturbed biological soil crusts (biocrusts) in five successional stages, from the hilly Loess Plateau region of China was tested. The five stages of biocrusts were light cyanobacterial crust, dark cyanobacterial crust, cyanobacterial with sparse moss crust, moss and tiny cyanobacteria patches crust and moss dominated crust. The results showed that 1) the soil water repellence was markedly increased both in the intensity and persistence since the formation of biocrusts. 2) The soil water repellence showed a decrease trend along with the successional stages of biocrusts. The soil water repellence of the biocrusts with the moss coverage above 20% was significantly lower than that of the cyanobacterial crusts. 3) The soil water repellence of the biocrusts was closely related to soil moisture and the dominant organism. The soil water repellence increased with the decrease of soil water content for the moss dominated biocrusts, while changed in a bimodal curve with the decrease of soil water content for the cyanobacterial biocrusts.

**Key words:** biological soil crusts; successional stage; water repellence; soil water content.

土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的现象<sup>[1]</sup>,是土壤重要的物理属性之一。斥水性土壤在世界范围内普遍存在,沙土、壤土、粘土均被发现具有斥水性<sup>[2]</sup>。土壤斥水性的存在有利于增加土壤

团聚体的水稳性,却降低了土壤的入渗能力,在降雨充分时容易形成超渗产流<sup>[3]</sup>。土壤斥水性对产流的影响具有尺度效应,在点、径流小区尺度上,斥水性可增加产流量,但在较大尺度上对产流量的影响不显著<sup>[4]</sup>。土壤斥水性的出现与消亡具有明显的时间和空间变异性<sup>[5]</sup>。土壤斥水性与土壤含水量密切相关,一般情况下,其响应关系呈单峰曲线,不同土壤出现斥水性峰值时的含水率不同<sup>[6]</sup>。美洲、澳洲以及以色列

\* 国家自然科学基金项目(41271298, 41171422)和中国科学院“西部之光”联合学者项目资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn  
2013-07-03 收稿, 2013-12-28 接受。

等<sup>[7]</sup>地区对土壤斥水性的研究较早且相对成熟,近年来西班牙、德国、日本等国关于斥水性的研究也日渐深入,人们逐渐关注斥水性土壤的入渗路径<sup>[2]</sup>及外界干扰(火烧等)后土壤斥水性的变化等<sup>[8]</sup>细节问题.土壤斥水性的测定方法有多种,如一些研究者利用进水值、水-固体接触角 $\phi$ 值来间接表示土壤的斥水性,而滴水穿透时间与酒精溶液入渗法是近年来最常用的两种直接测定土壤斥水性的方法<sup>[3]</sup>.

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓类和土壤中微生物以及其他生物体通过菌丝体、假根系和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的复杂复合体. Fischer 等<sup>[9]</sup>研究表明,演替初期的生物结皮土壤具有斥水性,但国内却鲜有涉及生物结皮对土壤斥水性影响的研究. Yang 等<sup>[10]</sup>在沙坡头沙漠地区研究了人工植被发育对不同立地条件、不同深度土壤斥水性的影响,发现植被恢复区土壤斥水性的增加可能是生物结皮的形成引起的. 但该研究采用毛管上升法间接测定斥水性,测定过程土样需要磨细过筛,破坏了土壤的原状结构,不能反映原状生物结皮土壤的斥水性.

生物结皮是黄土高原丘陵区退耕还林还草工程实施后大面积形成的生物地被物,笔者野外调查发现,生物结皮引起土壤表面对水分亲和性的改变,可能影响了土壤水文过程. 但是目前国内外有关这一现象的研究还鲜见报道. 为此,本文利用野外采集的原状生物结皮直接测定其土壤斥水性,探究该区生物结皮在浅色藻结皮、深色藻结皮、深色藻+少量藓(简称

藻+少量藓)结皮、藓+少量藻结皮、藓结皮5种不同发育阶段的土壤斥水性的变化规律,及其对土壤含水量变化的响应,以期为研究生物结皮对土壤水文过程的影响提供参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究主要在中国科学院安塞水土保持综合试验站的试验示范区进行. 该区地理位置为 $36^{\circ}43' - 36^{\circ}46' N, 109^{\circ}14' - 109^{\circ}16' E$ ,属典型的黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔1200 m,气候属中温带大陆性半干旱季风气候. 试验地年均气温 $8.8^{\circ}C$ ,年均降水量505 mm,年日照时数2300~2400 h,日照百分率达54%,全年无霜期157 d,干燥度1.48.

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的黄绵土(钙质干润锥形土)为主. 地带性植被为暖温性灌草丛和草甸草原群落,代表性群落有:长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)和猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等群落. 采样区藓结皮的优势藓种为短叶扭口藓(*Barbula tectorum*)和土生扭口藓(*Barbula vinealis*).

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集及处理 在研究区内不同退耕年限的自然撂荒坡地上,选取生物结皮发育良好、有代表性的退耕地作为研究样地,样地概况见表1. 每类生

表1 样地基本概况

Table 1 General status of the sampling plots

结皮类型 Crust type	样地重复 Plots replication	结皮盖度 Crust coverage (%)	藓类盖度 Moss coverage (%)	植被盖度 Vegetation coverage (%)	退耕年限 Rehabilitation age (a)	海拔 Elevation (m)	坡度 Gradient ( $^{\circ}$ )	坡向 Aspect
浅色藻 Light cyanobacterial crust	2	82.3	3.2	0	<1	1078	25	西 W
深色藻 Dark cyanobacterial crust	3	74.7	5.7	60	10~15	1121	18	东南 ES
藻+少量藓 Cyanobacterial with sparse moss crust	4	74.7	5.7	60	10~15	1121	18	南 S
		78.4	11.0	25	5~6	1125	0	-
藓+少量藻 Moss and tiny cyanobacteria mass patches crust	3	85.4	7.4	5	5~6	1125	0	-
		75.9	43.4	20	5~10	1282	0	-
藓 Moss crust	2	81.9	44.7	12.5	5~6	1120	0	东南 ES
		54.5	33.8	42.5	>20	1252	18	北 N
藓 Moss crust	2	84.6	42.1	60	>20	1242	16	北 N
		72.5	53.9	55	5~10	1293	10	西 W
藓 Moss crust	2	83.5	67.7	70	5~6	1118	0	东南 ES
		97.6	58.7	11	5~6	1135	0	-
藓 Moss crust	2	67.4	59.2	62.5	10~15	1127	10	-
		67.6	85.9	10	5~6	1130	0	东 E

- 位于坡顶 On the top of slope.

物结皮选 2~4 个样地, 每个样地设 3~4 个 5 m × 5 m 大样方, 在大样方内采取生物结皮层土样, 混合为一个分析样, 用于理化性质分析。

生物结皮覆盖度调查: 每个大样方用 25 样点法 (25 cm × 25 cm 样方) 在样地中随机布设 10 个样方, 调查生物结皮种类及盖度, 记录样方中藓、地衣、藻、裸土、小石砾、高等植物、植物枯落物的出现频次, 以各类物种在调查总点数的百分数, 计算其相应的覆盖度。同时记录采样区退耕年限、植被状况、海拔、坡度、坡向等立地条件。

根据藻结皮中藓类盖度 < 10%, 藻 + 少量藓结皮中藓类盖度 20% ~ 50%, 藓 + 少量藻结皮中藓类盖度 50% ~ 70%, 藓结皮中藓类盖度 > 70% 的标准, 结合生物结皮中藓类的盖度, 选取人为扰动少、相对完整的生物结皮, 用直径 9 cm、深 1 cm 的一次性无菌塑料培养皿, 在每类样地上各采取结皮样 25 个 (每样地 4~5 个)。同时在持续耕作的农田中采集完整土样 5 个作为对照。由于采样区的生物结皮的发育背景为退耕地, 因此, 本文以研究区立地条件类似的耕地土壤为对照 (20 个)。样品具体情况见表 2。

采集的生物结皮样风干后收藏。试验前选取无裂隙的生物结皮块, 用镊子去除表层的枯枝落叶、散落的土壤颗粒, 用洗耳球吹去表层浮土。

1.2.2 生物结皮层土壤理化指标测定方法 全氮采用半微量凯氏法测定, 有效氮采用碱解扩散法测定, 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

生物结皮厚度: 从塑料培养皿中取 4 cm<sup>2</sup> 大小的生物结皮块, 用小刀分离生物结皮与下层土壤, 用游标卡尺测量其 4 个方向的厚度, 取平均值。每类生物结皮重复 15 次。

藻结皮生物量<sup>[11]</sup>: 在暗处用研钵研磨结皮, 使

藻体与土壤分离, 并使藻体分散。取 (2 ± 0.01) g 样品装入具塞刻度试管中, 向试管中加入 10 mL 二甲亚砜 (DMSO), 置于 65 °C 的恒温水浴锅中避光萃取 1 h, 之后用滤纸过滤, 取上清液于波长 665 和 750 nm 处测定吸光值, 然后加 5 滴 1 mol · L<sup>-1</sup> 盐酸酸化, 10 min 后置于波长 665 和 750 nm 处再测定吸光值。藻类叶绿素 a 含量的计算公式为:

$$Chl a_{DMSO} = 26.73 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V/M$$

式中: Chl a<sub>DMSO</sub> 为 DMSO 法测定的叶绿素 a 含量 (μg · g<sup>-1</sup>); E<sub>665</sub> 和 E<sub>750</sub> 分别为 DMSO 法萃取液酸化前于波长 665 和 750 nm 处的吸光值; A<sub>665</sub> 和 A<sub>750</sub> 分别为 DMSO 法萃取液酸化后于波长 665 和 750 nm 处的吸光值; V 为萃取液体积 (mL); M 为结皮土样质量 (g)。

藓结皮生物量<sup>[11]</sup>: 将风干后遮光保存的藓结皮用水喷湿, 使其脱离休眠状态, 然后用打孔器取一定面积 (0.95 cm<sup>2</sup>) 的藓结皮样放入网筛中冲洗, 收集藓类植物放到称量瓶中, 于烘箱中 85 °C 杀青 30 min, 再于 65 °C 烘至恒量后称量, 计算出单位面积藓类植物生物量 (g · dm<sup>-2</sup>)。

### 1.2.3 土壤斥水性测定方法及过程

1) 土壤斥水性的测定: 本文使用改进的滴水穿透时间法、酒精溶液入渗法测定结皮层的斥水性。滴水穿透时间法反映斥水的持久性, 酒精溶液入渗法反映斥水的强度<sup>[12]</sup>。

滴水穿透时间法 (water drop penetration time, WDPT): 用标准滴管在 15 mm 高度滴 3 滴蒸馏水 (约 0.15 mL) 于处理过的生物结皮样表面, 用秒表记录液滴从生物结皮样表面消失的时间。采用普遍使用的斥水性分类标准, 将土壤斥水性分为 5 个等级 (表 3)<sup>[13]</sup>。

表 2 生物结皮土壤样品的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of biocrust soil (mean ± SE)

结皮类型 Crust type	厚度 Thickness (mm)	生物量 Biomass	有机质 Organic matter (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (mg · g <sup>-1</sup> )	有效氮 Available N (mg · kg <sup>-1</sup> )
浅色藻 Light cyanobacterial crust	1.22 ± 0.10	10.29 ± 0.70 μg · g <sup>-1</sup>	8.86 ± 0.16	1.131 ± 0.450	36.50 ± 15.90
深色藻 Dark cyanobacterial crust	0.99 ± 0.06	12.12 ± 1.16 μg · g <sup>-1</sup>	13.65 ± 4.28	1.090 ± 0.340	36.84 ± 11.70
藻 + 少量藓 Cyanobacterial with sparse moss crust	2.96 ± 0.11	1.24 ± 0.10 g · dm <sup>-2</sup>	14.74 ± 2.14	1.200 ± 0.212	43.23 ± 7.81
藓 + 少量藻 Moss and tiny cyanobacterial mass patches crust	3.22 ± 0.11	1.83 ± 0.09 g · dm <sup>-2</sup>	15.33 ± 4.31	1.271 ± 0.372	38.25 ± 13.90
藓 Moss crust	4.08 ± 0.34	1.96 ± 0.19 g · dm <sup>-2</sup>	18.66 ± 7.81	1.414 ± 0.708	54.51 ± 27.20

藻结皮生物量以单位土质中的叶绿素 a 含量表示, 藓结皮生物量以单位面积藓类植物生物量表示。The biomass of cyanobacterial crust was the content of chlorophyll a per unit soil mass, the biomass of moss crust was the biomass of moss per unit decimeter.

表 3 土壤斥水性等级划分标准<sup>[13]</sup>Table 3 Standards of soil water repellence rank<sup>[13]</sup>

等级 Rank	含义 Meaning	斥水时间 Water repellent time (s)
0	无斥水性 No water repellency	<5
1	轻微斥水性 Slight water repellency	5 ~ 60
2	强烈斥水性 Strong water repellency	60 ~ 600
3	严重斥水性 Serious water repellency	600 ~ 3600
4	极度斥水性 Extreme water repellency	>3600

酒精溶液入渗法 (molarity of ethanol droplet, MED): 用标准滴管将 3 滴已知浓度的酒精溶液 (约 0.15 mL) 在 15 mm 高度滴到处理过的风干生物结皮样表面, 记录液滴能否在 5 s 内从生物结皮样表面消失. 斥水性消失的酒精溶液浓度为临界浓度<sup>[3]</sup>. 酒精水溶液的配制: 用体积百分数 95% 的纯酒精加蒸馏水按比例配置成体积比 (酒精: 水) 为 1: 10、2: 10、3: 10、4: 10、5: 10、8: 10、9: 10 的酒精溶液, 混匀置于棕色试剂瓶中密封备用.

2) 含水量的设置: 土壤斥水性与含水量密切相关, 土壤斥水性随含水量的变化在一定范围内呈单峰曲线趋势<sup>[6]</sup>. 为探究生物结皮土壤斥水性对土壤含水量变化的响应, 以田间持水量为 100% 含水量, 风干含水量为 0, 设置 100%、80%、60%、50%、40%、20% 及风干土 7 个水分梯度.

处理过的每个生物结皮样称量后充分湿润, 用 3 层吸水纸准确吸水 3 min, 测其田间持水量<sup>[14]</sup>. 根据含水量梯度水平计算各生物结皮样在不同水分梯度时的质量. 测定从 100% 田间持水量开始, 在生物结皮样阴干至预期含水量时 (预期质量  $\pm 0.03$  g), 用滴水穿透时间法测其斥水时间.

### 1.3 数据处理

应用 SPSS 16.0 软件对不同类型生物结皮的斥水时间进行统计分析, 剔除 2 倍标准差之外的数据, 重复 2 次, 取平均值. 处理后的数据运用最小显著差异法 (LSD) 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ . 用 Excel 软件对生物结皮的斥水时间作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 生物结皮土壤斥水的持久性

用滴水穿透时间法测得的不同发育阶段风干生物结皮土壤斥水持久性如图 1 所示. 黄土高原丘陵区黄绵土 (对照) 滴水穿透时间 < 5 s, 不具斥水性. 浅色藻结皮土壤的斥水时间为 41.66 s, 发育至深色藻

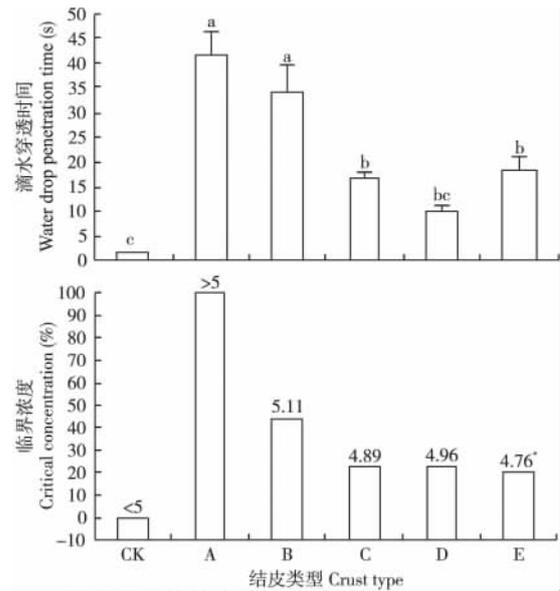


图 1 不同类型生物结皮土壤的斥水性

Fig. 1 Soil water repellence of biocrusts at their different successional stages.

CK: 农田土壤 Cropland soil; A: 浅色藻 Light cyanobacterial crust; B: 深色藻 Dark cyanobacterial crust; C: 藻 + 少量藓 Cyanobacterial with sparse moss crust; D: 藓 + 少量藻 Moss and tiny cyanobacterial patches crust; E: 藓 Moss crust. 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below. \* 临界浓度是计算出来并经过验证的 Critical concentration was calculated and verified.

结皮时土壤斥水时间略有下降, 但与浅色藻结皮土壤相比差异不显著. 随着生物结皮的演替, 结皮层土壤斥水持久性持续下降, 显著低于藻结皮土壤. 生物结皮的发育使不具斥水性的黄绵土变成具有轻微斥水性的生物结皮土壤, 发育初期生物结皮土壤的斥水持久性是同区农田土壤的 22.4 倍; 随着生物结皮的发育, 土壤斥水持久性逐渐降低, 但其持久性仍是农田土壤的 5.4 倍.

### 2.2 生物结皮土壤的斥水强度

用酒精溶液入渗法测得的不同发育阶段风干生物结皮土壤的临界斥水浓度如图 1 所示. 生物结皮增加了土壤的斥水强度. 随着生物结皮的演替, 生物结皮土壤的斥水强度逐渐降低. 酒精溶液在浅色藻结皮上消失的时间一直高于 5 s, 表明浅色藻结皮土壤的斥水性很强. 两种方法 (WDPT 和 MED) 测得的不同生物结皮土壤斥水性结果表明, 生物结皮不仅增加土壤的斥水持久性, 也能增加斥水强度. 斥水持久性大的生物结皮土壤, 斥水强度也大, 反之亦然.

### 2.3 含水量对生物结皮土壤斥水性的影响

用滴水穿透时间法测得的不同发育阶段生物结皮土壤在不同含水量的斥水时间如图 2 所示. 浅色藻

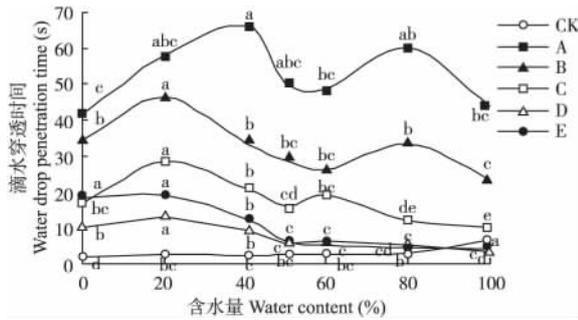


图2 含水量对生物结皮土壤斥水性的影响

Fig. 2 Influence of soil water content on soil water repellence of biocrusts.

结皮土壤的斥水时间约在 40% 田间持水量处达最大值(66.02 s),在其两侧呈现下降趋势. 深色藻结皮土壤及藻+少量藓、藓+少量藻两种混合结皮土壤的斥水时间随含水量的变化规律与浅色藻结皮土壤相似,均在 20% 田间持水量处达最大值(分别为 46.46、28.33、13.25 s),在其两侧时斥水性显著降低. 藓结皮土壤的斥水性稍有差异,随着含水量的降低,其斥水时间持续增大,在 20% 田间持水量处达最大值并趋于稳定.

### 3 讨 论

#### 3.1 不同发育阶段生物结皮土壤的斥水性

土壤斥水性是由土壤中疏水性有机化合物(有机质分解产生的蜡状复杂有机酸)包裹土壤颗粒引起的,土壤含水率、颗粒组成、有机质含量、pH 值、生物膜等是影响土壤斥水性的主要因素. 一般来说,质地较粗的土壤容易产生斥水性,但是细颗粒成分多的土壤在遇到合适的条件时也会产生严重的斥水<sup>[15]</sup>. 干旱半干旱地区普遍发育的生物结皮显著改变了土壤表面属性,不仅细化土壤<sup>[16]</sup>,降低土壤 pH 值<sup>[17]</sup>,增加有机质含量<sup>[18]</sup>,还为土壤动物提供了宜居环境,土壤动物的排泄物也会间接增加土壤有机质的含量<sup>[10]</sup>,进而可能引起土壤斥水性的变化. 本文结果证实,黄土高原丘陵区的黄绵土没有发生斥水现象,但生物结皮形成后土壤斥水性显著增加. 这与 Fischer 等<sup>[9]</sup>的研究结果一致. 本研究表明,生物结皮的形成使得结皮层土壤斥水性增加,为对照的 22.4 倍,这可能与生物结皮的发育引起的土壤颗粒组成、有机质含量及微生物数量的变化有关. Yang 等<sup>[10]</sup>研究表明,土壤斥水性与 <0.15 mm 粒径的土壤含量和有机质含量呈正相关关系. 高丽倩等<sup>[16]</sup>研究表明,生物结皮可使结皮层土壤中的细砂粒(0.05~0.25 mm)含量增加 45%;郑云普等<sup>[19]</sup>研究

表明,藻类生长分泌胞外多糖,单位生物量藻类产生约 1.4 倍的有机质,聚集在生物结皮表面形成有机质层. 此外,土壤中的微生物能够产生斥水性次生代谢产物,其中的细菌能够直接产生斥水性化合物<sup>[20]</sup>. 而边丹丹等<sup>[21]</sup>研究表明,生物结皮能够显著增加结皮层土壤微生物的总含量及细菌的含量. 因此,生物结皮形成后土壤斥水性急剧增加.

本文分析结果显示,当结皮中藓类盖度在 20% 以上时,土壤斥水性显著低于藻结皮土壤. 这可能是生物结皮发育过程中土壤真菌含量、孔隙度及优势种的变化引起的. 土壤斥水性与真菌含量呈显著正相关<sup>[22]</sup>,而土壤孔隙能够通过影响水分入渗间接影响土壤的斥水性<sup>[23]</sup>. 生物结皮发育初期结皮层较薄,真菌含量最高;随发育年限的增加,结皮层加厚,真菌含量明显减少<sup>[21]</sup>. 随着生物结皮的发育,结皮层土壤孔隙度增加了 14%<sup>[16]</sup>. 孔隙度的增加增强了水分入渗的能力,从而可能导致斥水性的降低. Fischer 等<sup>[9]</sup>认为,生物结皮土壤斥水性的变化与结皮中的优势种有关. 丝状藻类是该研究区藻结皮的优势种<sup>[24]</sup>,在生物结皮的演替过程中,藓类逐渐代替藻类成为优势物种. 藻类分泌的胞外多糖有很强的吸水作用,可吸收的水量多达自身质量的 10 倍<sup>[25]</sup>,而胞外多糖的分泌随着藻结皮的发育逐渐增多<sup>[19]</sup>;苔藓植物常形成垫状、丛状或毯状的生长型,从而提高了毛细管系统的吸水能力;藓类叶片上的疣和突起有利于水分的传导,使水分尽快被植物细胞吸收<sup>[26]</sup>. 因此,生物结皮演替过程中藓类盖度超过 20% 后,土壤斥水性显著降低.

#### 3.2 生物结皮土壤斥水性对水分变化的响应

本研究是从 100% 田间持水量到风干土的顺序来测定生物结皮土壤斥水性的,这一测定顺序基本上可以保证生物结皮中水分含量的均匀性. 当生物结皮中藓类为优势种时,土壤斥水性随着含水量的降低逐渐增加. 这可能是因为结皮生物是变水植物,对含水量的变化反应敏感. 藓结皮能够直接吸收水分,湿水时枝叶铺展开,覆盖度增加,生物量增加 13 倍或者更多<sup>[27]</sup>. 当土壤含水量较高时,生物结皮的活性大、生物量高,形成的“垫状”结构层能够迅速吸收水分,表现出较低的斥水性. 随着含水量的降低,生物结皮活性随之降低,生物量逐渐减少,藓类铺展开的枝叶收缩,“垫状”结构层消失,藓结皮土壤表现出较高的斥水性.

本研究表明,在生物结皮中藻类为优势种时,土壤斥水性随含水量的变化呈双峰曲线. 而陈俊英

等<sup>[6]</sup>研究土壤斥水性与含水量变化的关系时发现,土壤斥水性随含水量的变化呈单峰曲线.产生这种差异的原因可能与藻类的生理习性有关.黄土高原丘陵区藻类的优势种属颤藻科,自然环境下藻丝外面包有厚厚的胶鞘.这些胶鞘主要为一些多糖组成的胞外聚合物,遇水时能迅速吸收干质量 8~12 倍的水量<sup>[28]</sup>.土壤含水量较高时,包裹藻类的胶鞘大量吸水,生物结皮土壤表现出较低的斥水性.吸水后的胶鞘逐渐膨胀,堵塞生物结皮中的气孔,延缓水分在土壤中的入渗<sup>[9]</sup>,生物结皮土壤的斥水性继而表现出增加的趋势.由于本试验在 2 d 内完成,试验中土壤含水量保持在 50% 田间持水量约 8 h,可能导致藻类在这段时间内形成了新的胶鞘,重新开始试验时胶鞘数量增多<sup>[29]</sup>,因此土壤斥水时间在含水量低于 50% 田间持水量时出现另一峰值,并且这一峰值更大.当含水量持续降低,土壤变干燥时,膨胀的胶鞘失水收缩,水分入渗逐渐恢复,生物结皮土壤又表现出较低的斥水性.

#### 4 小 结

本文采用滴水穿透时间法和酒精溶液入渗法测定了黄土高原丘陵区不同发育阶段生物结皮土壤斥水性变化特征及其对土壤含水量的响应.结果表明:生物结皮增加了土壤的斥水性.黄土高原丘陵区黄绵土没有发生斥水现象.生物结皮发育后土壤的斥水强度和持久性均显著增加,具轻微斥水性.生物结皮土壤斥水性随生物结皮演替逐渐降低,当结皮中藓类盖度在 20% 以上时,其土壤斥水时间显著低于藻结皮土壤.生物结皮土壤的斥水性与含水量及优势种密切相关.藓类生物结皮土壤的斥水性随着含水量的降低逐渐增加;藻类生物结皮土壤的斥水性随含水量的变化呈双峰曲线.浅色藻结皮土壤斥水性约在 40% 田间持水量时最大,而深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮、藓结皮 4 种结皮层土壤的斥水性则在 20% 田间持水量时最大.

#### 参考文献

[1] Yang B-J (杨邦杰), Blackwell PS, Nicholson DF. Research of soil degradation caused by soil water repellency, the survey method and measures of improvement. *Journal of Environmental Science (环境科学)*, 1993, **15**(4): 88-90 (in Chinese)

[2] Xiong Y, Wallach R, Furman A. Modeling multidimensional flow in wettable and water-repellent soils using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 2011, **410**: 92-104

[3] Li Y (李毅), Shang Y-L (商艳玲), Li Z-H (李振华), et al. Advance of study on soil water repellency. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报)*, 2012, **43**(1): 68-75 (in Chinese)

[4] Min L-L (闵雷雷), Yu J-J (于静洁). Progress in the research of soil water repellency and its influences on overland flow generation. *Advances in Earth Science (地球科学进展)*, 2010, **29**(7): 855-860 (in Chinese)

[5] Buczko U, Bens O, Hüttl RF. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma*, 2005, **126**: 317-336

[6] Chen J-Y (陈俊英), Wu P-T (吴普特), Zhang Z-T (张智韬), et al. Response models for soil water repellency and soil moisture. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报)*, 2012, **43**(1): 63-67, 82 (in Chinese)

[7] Roberts FJ, Carbon BA. Water repellence in sandy soils of south-western Australia. II. Some chemical characteristics of the hydrophobic skins. *Australian Journal of Soil Research*, 1972, **10**: 35-42

[8] Rodríguez-Alleres M, Varela ME, Benito E. Natural severity of water repellency in pine forest soils from NW Spain and influence of wildfire severity on its persistence. *Geoderma*, 2012, **191**: 125-131

[9] Fischer T, Veste M, Wiehe W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbial crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena*, 2010, **80**: 47-52

[10] Yang HT, Liu LC, Li XR, et al. Characteristics of soil water repellency after sand dune stabilization in the Tengger Desert. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, **4**: 408-416

[11] Qin N-Q (秦宁强), Zhao Y-G (赵允格). Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, **22**(9): 2259-2264 (in Chinese)

[12] Wu Y-L (吴延磊), Li Z-Z (李子忠), Gong Y-S (龚元石). Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2007, **23**(7): 8-13 (in Chinese)

[13] Letey J, Carrillo MLK, Pang XP. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 2000, **231-232**: 61-65

[14] Ming J (明姣), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), et al. Biological soil crust nitrogenase activity and its responses to hydro-thermic factors in different erosion regions on the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2013, **24**(7): 1849-1855 (in Chinese)

[15] Liu L-C (刘立超), Yang H-T (杨昊天), Li X-R (李新荣), et al. The advances in soil water repellency and its eco-hydrological effects. *Advances in Earth Science (地球科学进展)*, 2011, **26**(9): 926-932 (in Chinese)

- nese)
- [16] Gao L-Q (高丽倩), Zhao Y-G (赵允格), Qin N-Q (秦宁强), *et al.* Impact of biological soil crust on soil physical properties in the hilly Loess Plateau region, China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2012, **27**(8): 1316 - 1326 (in Chinese)
- [17] Xiao B (肖波), Zhao Y-G (赵允格), Shao M-A (邵明安). Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(11): 4662 - 4670 (in Chinese)
- [18] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J (王全九), *et al.* Physical and chemical properties of soil biocrust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(8): 1429 - 1434 (in Chinese)
- [19] Zheng Y-P (郑云普), Zhang B-C (张丙昌), Zhao J-C (赵建成), *et al.* The contribution of *Microcoleus vaginatus* to the formation of algal crust in the arid desert. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(6): 1655 - 1664 (in Chinese)
- [20] Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews*, 2000, **51**: 33 - 65
- [21] Bian D-D (边丹丹), Liao C-Y (廖超英), Sun C-Z (孙长忠), *et al.* Effect of soil biological crust on the distribution of soil microorganisms in the loess hilly region. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, **29**(4): 109 - 114 (in Chinese)
- [22] Young IM, Feeney DS, O'Donnell AG, *et al.* Fungi in century old managed soils could hold key to the development of soil water repellency. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **45**: 125 - 127
- [23] Rulli MC, Bozzi S, Spada M, *et al.* Rainfall simulations on a fire disturbed mediterranean area. *Journal of Hydrology*, 2006, **327**: 323 - 338
- [24] Yang L-N (杨丽娜), Zhao Y-G (赵允格), Ming J (明姣), *et al.* Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: A preliminary result. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(14): 4416 - 4424 (in Chinese)
- [25] Issa OM, Defarge C, Trichet J, *et al.* Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics. *Catena*, 2009, **77**: 48 - 55
- [26] Wu Y-H (吴玉环), Cheng J-Q (程佳强), Feng H-Y (冯虎元), *et al.* Advances of research on desiccation-tolerant moss. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2004, **24**(1): 23 - 29 (in Chinese)
- [27] Galun M, Bubrick P, Garty J. Structural and metabolic diversity of two desert-lichen populations. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 1982, **53**: 321 - 324
- [28] Verrecchia E, Yair A, Kidron GJ, *et al.* Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, northwestern Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1995, **29**: 427 - 437
- [29] Belnap J, Gardner JS. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: The role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *Great Basin Naturalist*, 1993, **53**: 40 - 47

---

作者简介 张培培,女,1989年生,硕士研究生.主要从事生物土壤结皮及其生态功能研究. E-mail: zhangpei3000@126.com

责任编辑 张凤丽

---