

黄土丘陵区生物土壤结皮表面糙度特征及影响因素*

王媛^{1,2} 赵允格^{2**} 姚春竹^{1,2} 张培培^{2,3}

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 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中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 地表糙度是影响地表径流和侵蚀过程的重要属性. 生物结皮在干旱半干旱区广泛分布, 是地表糙度的影响因子之一. 本文采用链条法测定了黄土丘陵区不同发育阶段生物结皮表面糙度特征, 分析了不同发育阶段生物结皮表面糙度对坡向、土壤含水量和冻融作用的响应及其与各理化性质的相关性, 初步探索了生物结皮对地表糙度的影响及其相关因素. 结果表明: 生物结皮显著改变地表糙度, 随着生物结皮从藻结皮向藓结皮演替, 其糙度先降低后增加, 生物结皮发育形成 10 年以后, 其表面糙度基本趋于稳定; 研究区早期形成的藻结皮表面糙度较裸土降低 47.0%, 深色藻结皮(藓类盖度 < 20%) 较裸土降低 20.4%, 混生结皮(藓类盖度为 20% ~ 60%) 和苔藓结皮(藓类盖度 > 70%) 表面糙度与深色藻结皮基本一致; 坡向对发育 10 年以上的生物结皮表面糙度的影响不显著; 土壤含水量影响地表糙度特征. 研究区浅色藻结皮表面糙度随水分变化较为剧烈; 随着生物结皮发育, 深色藻结皮、混生结皮和苔藓结皮表面糙度随水分的变化趋于平缓. 冻融增加了生物结皮表面糙度. 浅色藻结皮经两次冻融后表面糙度增加 29.7%; 深色藻结皮、混生结皮和藓结皮表面糙度的影响需经过反复冻融才有所体现. 生物结皮表面糙度与藓结皮盖度呈显著正相关($P < 0.1$).

关键词 生物土壤结皮 发育阶段 生物结皮表面糙度 影响因子 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2014)03-0647-10 中图分类号 S152.2 文献标识码 A

Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the hilly Loess Plateau region, China. WANG Yuan^{1,2}, ZHAO Yun-ge², YAO Chun-zhu^{1,2}, ZHANG Pei-pei^{2,3} (¹ College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ² State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(3): 647-656.

Abstract: Soil surface roughness exerts profound influence on runoff and sediments yield from slopes. Biological soil crusts (BSCs) are ubiquitous living cover in the open spaces between plants in arid and semiarid ecosystems, which considerably impact the surface roughness. Aimed to determine the effect of biological crusts on the surface roughness and its influence factors, this study investigated the surface roughness of soil with BSCs at their different successional stages by using the chain method. Besides, the impacts of slope aspects, soil water content and freezing and thawing on surface roughness were also investigated. Then, the correlations between roughness and soil chemical and physical properties were evaluated. The results showed that soil surface roughness decreased at the initial successional stage of BSCs but increased along with BSCs' development in the region. Soil roughness tended to be stable since BSCs developed ten years later. The roughness was reduced by 47.0% by the light cyanobacteria-dominated crust and 20.4% by the dark cyanobacteria-dominated crust (moss coverage < 20%), compared with the bare soil. Soil moisture significantly impacted surface roughness. The surface roughness of BSCs changed obviously with soil moisture in the early development, but only slightly in their later succession. Freezing-thawing also affected surface roughness with BSCs. Roughness was more susceptible to freezing-thawing in the early de-

* 国家自然科学基金项目(41271298 40971174)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

2013-08-09 收稿, 2013-12-22 接受。

velopment of BSCs, with an increase of 29.7% compared with the bare soil. The surface roughness of late successional BSCs exhibited a slight change only after repeated freezing-thawing. The surface roughness of BSCs showed a statistically significant relationship with the coverage of moss ($P < 0.1$).

Key words: biological soil crusts; development of biocrusts; roughness of biological crusts; influence factor; the hilly Loess Plateau region.

地表糙度是由作物种植及其管理措施、人为土地管理和土壤侵蚀等因素共同作用而形成的地表起伏和凹凸不平的现象,是地面主要物理性状之一,反映了地表微地貌形态,是影响地表径流和侵蚀过程的重要因素^[1].其影响程度与降雨规模、降雨-径流过程所处的阶段以及坡度等因素有关^[2-6].地表糙度对水分入渗也会产生影响^[7].早在 20 世纪 60 年代, Kuripers^[8]对地表糙度的重要性进行了评述,并提出了初步的研究设想.随后,国内外学者对地表糙度方面展开了许多有针对性的研究,发现耕作类型和次数^[9]、累积降雨动能和降雨量^[10]、土壤含水量^[11]、土壤容重等其他土壤性质影响着地表糙度^[11-14].已有的研究多集中于坡耕地,主要研究了耕作措施对地表糙度的影响及其对坡面径流的作用^[14-15].

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^[16-18].是干旱半干旱地区常见的生物地被物,显著影响并改变下层土壤理化性状,如提高土壤田间持水量^[19]、增加土壤有机质含量^[20]和表层土壤粘聚力等,进而可能影响地表糙度.目前,有关地表糙度的研究鲜见涉及生物结皮的影响. West^[16]认为,生物结皮中苔藓、地衣、藻类等微生物与土壤的复合会明显增加地表的粗糙度和微形态.但其研究却仅限于对模拟降雨过程中生物结皮对雨滴动能响应原因的猜测,并未进行定量化研究. Rodríguez-Caballero 等^[21]对 3 种不同发育程度的生物结皮地表糙度进行测定,结果表明,地表糙度指数值大小依次为从未移除过结皮的表面糙度 > 移除后发育 4 年的结皮表面糙度 > 移除后发育 2 年的结皮表面糙度.然而,该研究来自沙漠地区,侧重于小区中生物结皮群落发展中表面糙度的变化,其研究结果难以推广到其他地区,加之其仅对 3 种结皮进行测定,从而不能反映生物结皮发育过程中对地表糙度的影响.

在水蚀严重的黄土丘陵区,由于退耕还林(草)

的实施,生物结皮广为发育,盖度可以达到 70% 左右^[22-23],显著影响了土壤表面起伏状况.认识生物结皮发育过程中地表糙度的变化及其影响因素,将对明确生物结皮坡面的产汇流过程具有重要意义.为此,本文以黄土丘陵区退耕地上不同发育阶段的生物结皮为研究对象,采用经典的链条法,以表面糙度指数 Cr 表征地表糙度,通过野外调查、采样并进行各项物理性指标分析,研究了生物结皮发育过程中地表糙度的变化及其影响因子,探索性地揭示了生物结皮的发育形成对地表糙度的影响,以期明确黄土丘陵区生物结皮对产汇流的影响奠定基础.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

试验在中国科学院安塞水土保持综合试验站的山地试验场(36°43'—36°46' N, 109°14'—109°16' E, 平均海拔 1200 m)进行.该站地处黄土高原中部的陕西省延安市安塞县境内,属典型的梁峁状丘陵沟壑区.研究区年均气温 8.8 °C,年均降水量 505 mm,年日照时数 2300 ~ 2400 h,全年无霜期约 160 d,干燥度 1.48.地带性土壤为黑垆土,但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(钙质干润雏形土)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 daurica*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)以及猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)群落等.

退耕还林实施后,研究区封禁的荒坡草地上生物结皮覆盖度可以达到 60% ~ 70%,主要分布于高等维管束植物之间的空地上,沟坡较梁峁坡分布面积更广.组成上,阴坡以藓类植物结皮为主,阳坡则以藻结皮为主,地衣成分较少(盖度小于 10%)^[24].研究区藓结皮主要包括 2 科 6 种,分别为丛藓科的土生扭口藓(*Barbula vinealis*)、细叶扭口藓(*Barbula perobtusa*)、尖叶扭口藓(*Barbula trachypus* var. *bicolor*)、绿色流苏藓(*Crossidium squamigerum*)、皱叶毛

口藓 (*Trichostomum crispulum*)、钝叶芦荟藓 (*Aloina rigida*) 和真藓科的刺叶真藓 (*Bryum cirrhatum*)^[25]。在退耕地的生物结皮中, 以土生扭口藓为优势种, 间或有其他藓类植物出现。研究区藻结皮优势种主要有具鞘微鞘藻 (*Microcoleus vaginatus*)、点形粘球藻 (*Gloeocapsa punctata*) 和小席藻 (*Phomidium tenue*) 等^[26]。

1.2 试验方法

1.2.1 野外调查 1) 生物结皮组成及覆盖度调查: 在调查区共选择代表性样地 22 个, 每个样地用 25 样点法 (25 cm × 25 cm 样方) 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, 以各类物种占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。

2) 生物结皮表面糙度的测定: 2012 年 7 月—2012 年 9 月, 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, 根据实际情况将不同退耕年限的每个样地分为 3~4 个小样地随机调查。样地基本概况见表 1。采用由 Ali^[27] 提出的链条法测定结皮表面糙度 (图 1)。其原理是: 当给定长度 (L_1 , mm) 的链条置于地表时, 其水平长度 (L_2 , mm) 随着结皮表面糙度的增加而减小。根据链条长度的减小值即可计算出表面糙度指数 (C_r):



图 1 链条法图示

Fig. 1 Sketch of chain method.

$$C_r = (1 - L_2/L_1) \times 100$$

本研究中选用 L_1 为 200 mm、链条直径 0.91 mm、链节长 1.12 mm 的银质链条。用链条对不同发育阶段的生物结皮表面糙度特征进行调查。选择高等植被间的空地进行调查, 以避免植被根系的影响, 并以无生物结皮的坡耕地为对照 (选取的无生物结皮生长地是进行过土地平整的坡耕地), 每个样地重复 60 次, 取平均值。

1.2.2 样品采集 在糙度野外调查的基础上, 用下有隔板、直径 20 cm 的 PVC 管采集与管大小一致、相对完整的不同发育阶段生物结皮样品, 采取的原状土深度为 6 cm, 获取生物结皮原状样品物种信息 (表 2)。采用链条法测定表面粗糙度, 每个样地 3~5 个重复, 选取无生物结皮生长平整的耕地地表为对照。

表 1 调查样地基本概况

Table 1 General status of the sampling plots

退耕年限 Rehabilitated years	样地重复数 Number of sampling points	植被盖度 Vegetation coverage (%)	生物结皮盖度 Crust coverage (%)	藻结皮盖度 Cyanobacteria coverage (%)	苔藓结皮盖度 Bryophyte coverage (%)	地衣结皮盖度 Lichen coverage (%)
对照 CK	1	-	-	-	-	-
5 年以下 Less than 5 years	6	21.3	76.2	53.1	22.6	0.6
5~10 年 5-10 years	5	45.6	81.6	41.6	39.8	0.2
10~20 年 10-20 years	5	62.0	70.1	33.1	36.9	0.1
20 年以上 20 years or more	5	60.0	68.9	30.6	36.6	1.7

表中“生物结皮盖度”为藻结皮盖度、苔藓结皮盖度及地衣结皮盖度之和 The crust coverage was the sum of cyanobacteria coverage, bryophyte coverage and lichen coverage in the table. 下同 The same below.

表 2 生物结皮原状样品物种信息

Table 2 Species information of the original sample of biocrusts

结皮类型 Crust type	采样数 Number of samples	浅色藻结皮盖度 Light cyanobacteria coverage (%)	深色藻结皮盖度 Dark cyanobacteria coverage (%)	苔藓结皮盖度 Lichen coverage (%)
浅色藻结皮 Light cyanobacteria ¹⁾	6	100	0	0
深色藻结皮 Dark cyanobacteria ²⁾	6	5.3	75.3	19.3
混生结皮 Compound of cyanobacteria and moss ³⁾	12	4.2	46.0	49.8
苔藓结皮 Bryophytes moss ⁴⁾	6	1.3	20.0	78.7

1) 藓类盖度为 0 Moss coverage was 0; 2) 藓类盖度 < 20% Moss coverage < 20%; 3) 藓类盖度在 20%~60% Moss coverage 20%~60%; 4) 藓类盖度 > 70% Moss coverage > 70%。原状生物结皮中无地衣结皮 The sample didn't contain any lichens.

表 3 不同坡向条件下发育 10 年以上生物结皮样地概况

Table 3 Sampling plot characteristics of biocrusts with different sloped aspects under rehabilitated after 10 years

坡向 Aspect	样地重复数 Number of sample points	植被盖度 Vegetation coverage (%)	生物结皮盖度 ^a Crust coverage (%)	藻结皮盖度 Cyanobacteria coverage (%)	苔藓结皮盖度 Bryophyte coverage (%)	地衣结皮盖度 Lichen coverage (%)
南 South	3	53.3	60.5	45.0	14.5	1.0
北 North	4	63.8	82.3	27.5	54.2	0.7

1.3 试验设计

1.3.1 坡向对生物结皮表面糙度的影响试验 在糙度野外调查的基础上,选取发育 10 年以上南北坡向的生物结皮典型样地.由于调查过程中样地难以寻找,造成样地数目有限.南坡向选取 3 个样地,北坡向选取 4 个样地(表 3),用以反映坡向对生物结皮表面糙度的影响.

1.3.2 水分对生物结皮表面糙度的影响试验 在 25 °C 条件下,测定含水量 100%、80%、70%、60%、50%、40%、20% 及风干土样的不同发育阶段生物结皮表面糙度(以田间持水量作为 100% 含水量,风干土的含水量为 0).水分设置时,为使整个土体水分均匀,采用称量法测定其需水量后,加水超过所需含水量的 5%,然后静置至所需含水量,使其水分下渗,在整个土体内分布均匀.每个 PVC 管内设 10 次重复测定,取其平均值.

1.3.3 冻融作用对生物结皮表面糙度的影响试验 样品在田间持水量的条件下 -4 °C 冷冻,取出,于 25 °C 下将样品融化,分别测定冻融前表面糙度及每次冻融后的表面糙度.冻融 2 次,每个 PVC 管内设 10 次重复测定,取其平均值.

1.3.4 测定方法 1) 土壤有机质: $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加加热法. 2) 结皮层容重: 涂膜法^[28]. 3) 土壤粘结力: 用土壤剪切力仪分别测定保留结皮层的土壤粘结力^[29-30],由于样品面积有限,各重复测定 3 次,取平均值($kg \cdot cm^{-2}$). 4) 苔藓结皮生物量: 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($0.95 cm^2$)的苔藓结皮样放入网筛中冲洗,收集苔藓植物放到称量瓶中,于烘箱中 85 °C 杀青 30 min 后 65 °C 烘至恒量后称量,计算单位面积苔藓植物生物量($g \cdot dm^{-2}$). 5) 苔藓结皮盖度: 采用 25 点样方法,将均匀分布的 25 点调查样方置于 PVC 管上方,逐一调查每点的生物结皮组成,然后计算苔藓的百分比.

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 统计分析软件进行数据处理和统计分析.对不同发育阶段及不同类

型的生物结皮表面糙度、不同土壤含水量条件及反复冻融后的生物结皮表面糙度指标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 $\alpha = 0.05$.对不同类型的生物结皮表面糙度及所对应的测定指标进行 Pearson 相关分析,显著性水平设定为 $\alpha = 0.1$ (本文采用野外原状土,变异性较大,故显著性水平设为 0.1).

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段生物结皮表面糙度特征

2.1.1 不同发育阶段生物结皮对其表面糙度的影响

有研究表明,不同发育阶段生物结皮对土壤物理属性的影响不同,如结皮层容重、结皮层土壤粘结力以及田间持水量等^[19]都可能影响不同发育阶段生物结皮表面糙度存在差异.不同发育阶段的生物结皮表面糙度会随着生物结皮的发育年限经历先减后增的变化过程(图 2).生物结皮表面糙度在其发育初期(浅色藻结皮)降低幅度较大,可达 26.9%;在生物结皮发育 5~10 年内,其表面糙度略高于生物结皮发育初期,退耕 10~20 年内地表糙度持续增加,较裸地增加 4.9%;生物结皮发育 10 年以后(逐渐由地表藻结皮转化为有大量藓类植物参与的地上生物结皮),其表面糙度基本不发生变化,20 年以

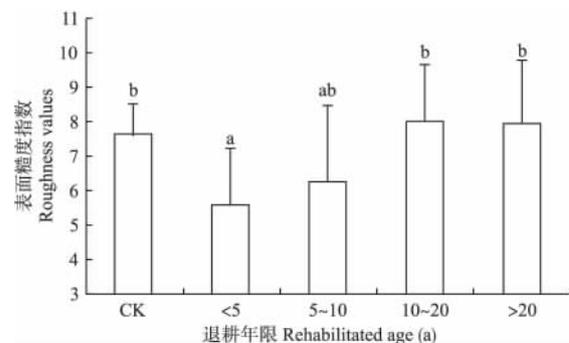


图 2 不同发育阶段生物结皮及表面糙度

Fig. 2 Roughness of biocrusts with different growth stages (mean \pm SE).

CK: 对照 Control. 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 4 样地生物结皮表面糙度指数特征值

Table 4 Characteristic value of the roughness of sampling plots

退耕年限 Rehabilitated years	平均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	中值 Median	众值 Mode	变异系数 CV (%)
对照 CK	7.66	11.75	3.88	7.50	8.13	28.8
5 年以下 Less than 5 years	5.68	10.35	2.33	4.91	4.59	40.2
5 ~ 10 年 5 - 10 years	6.95	12.55	3.45	6.35	5.95	37.1
10 ~ 20 年 10 - 20 years	8.03	14.23	3.41	7.59	7.36	37.8
20 年以上 20 years or more	7.95	14.74	3.93	7.43	7.33	33.5

上的结皮表面糙度为 7.95(表 4). 方差分析结果表明, 生物结皮发育 5 年以上与无生物结皮生长的对照组的差异不显著, 但结皮发育初期(即退耕 5 年之内, 地表多有浅色藻结皮覆盖) 则与对照组有显著差异. 说明结皮发育初期降低了地表糙度; 随着生物结皮发育年限的延长, 地表糙度较生物结皮发育初期有了显著增加, 且逐渐趋于稳定.

2.1.2 不同类型的生物结皮对其表面糙度的影响

一般认为, 根据生物结皮所处不同阶段优势种的变化, 其演替过程经历了藻、地衣和苔藓^[31-32], 且结皮生物量会随其发育年限的延长而有所增加^[23]. 因此, 生物结皮的生物组分在一定程度上可以表征生物结皮的发育程度. 由图 3 可以看出, 生物结皮表面糙度随生物结皮类型的不同呈现出先减后增的趋势. 浅色藻结皮表面糙度比对照组减少 47.0%, 差异显著; 深色藻结皮表面糙度增加至 6.08, 显著高于浅藻, 但仍较对照组减少 20.4%, 此后发育阶段表面糙度基本趋于稳定; 混生结皮和苔藓结皮较深色藻结皮的表面糙度差异不显著. 这表明生物结皮

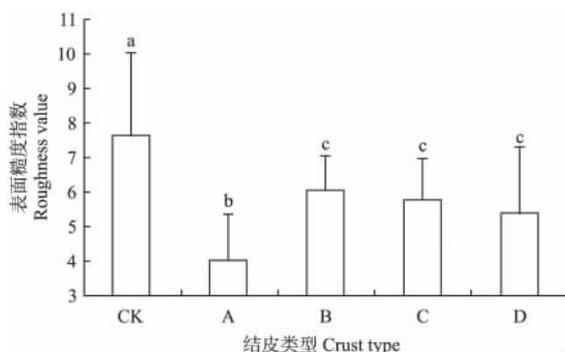


图 3 风干条件下不同类型生物结皮地表糙度

Fig. 3 Roughness of biocrusts with variable types under air-dried condition (mean \pm SE).

A: 浅色藻结皮, 藓类盖度 0 Light cyanobacteria, moss coverage was 0; B: 深色藻结皮, 藓类盖度 < 20% Dark cyanobacteria, moss coverage < 20%; C: 混生结皮, 藓类盖度 20% ~ 60% Compound of cyanobacteria and moss, moss coverage 20% - 60%; D: 苔藓结皮, 藓类盖度 > 70% Bryophyte moss, moss coverage > 70%. 下同 The same below.

在发育过程初期表面糙度显著降低, 随着生物结皮的继续发育, 其表面糙度显著增加, 之后趋于稳定.

2.2 生物结皮发育过程中表面糙度的影响因子

2.2.1 坡向对生物结皮表面糙度的影响

一般流域内, 阳坡指坡向为南、东南和西南的坡向, 而阴坡为北、东北和西北的坡向. 研究区流域内, 阴、阳坡向土壤的理化性质、作物产量、土地生产力、土壤水分状况等均存在显著性差异^[33-35], 因此可能导致不同坡向发育的生物结皮地表糙度存在差异. 由图 2 可知, 发育 10 年以上生物结皮的表面糙度基本趋于稳定. 为排除不同发育阶段生物结皮与坡向对其表面糙度的交互影响, 本研究选取发育 10 年以上南北坡向的生物结皮典型样地, 对其表面糙度进行调查, 以了解坡向对进入稳定期后生物结皮表面糙度的影响. 由图 4 可以看出, 退耕 10 年后, 阴、阳坡向(南北坡向)对地表表面糙度的影响不明显. 即生物结皮进入稳定期后, 坡向对其表面糙度的影响不显著.

2.2.2 土壤水分对生物结皮表面糙度的影响

土壤性质对地表糙度有一定影响, 但其影响主要由土壤含水量来体现. 土壤含水量不仅直接影响地表糙度, 也通过下渗间接地影响其他土壤特性, 进而反作用于地表糙度^[11-13, 36]. 图 5 反映了不同土壤含水量条件下, 不同生物类型的生物结皮表面糙度的变化情

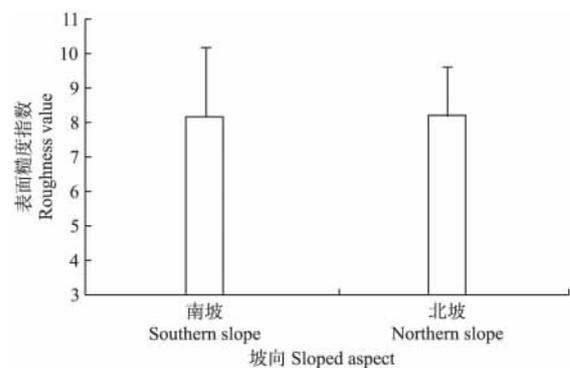


图 4 不同坡向条件下发育 10 年以上生物结皮表面糙度

Fig. 4 Roughness of biocrusts with different sloped aspects rehabilitated after 10 years (mean \pm SE).

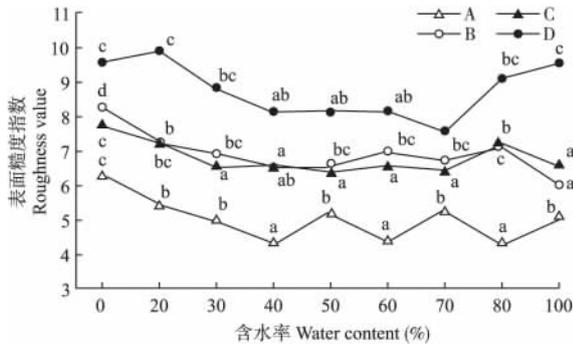


图5 土壤水分对生物结皮表面糙度的影响

Fig. 5 Influence of soil water content on the roughness of biocrusts (mean ± SE).

况. 总体来看, 生物结皮表面糙度对水分的响应不明显, 但在土壤水分较高和较低时, 水分对生物结皮表面糙度的响应则有所体现. 就浅色藻结皮而言, 其表面糙度的凹凸交错阶段较为短暂, 但在风干含水量条件下, 其表面糙度较其他含水量有显著增加; 当其含水量高于40%田间持水量后, 呈现凹凸交错阶段变化较为剧烈的现象. 深色藻结皮变化较为平缓, 仅在田间持水量和风干含水量条件下存在显著性差异. 混生结皮是深色藻结皮和苔藓的共生组合, 其表面糙度在含水量为0%、20%和80%田间持水量条件下存在显著性差异. 苔藓结皮表面糙度在土壤含水量为70%时显著降低. 表明随着水分梯度的不同, 不同生物组成的生物结皮呈现出不同的变化. 土壤水分较高和/或较低时, 水分对生物结皮表面糙度的响应有所体现, 且在生物结皮发育初期, 其表面糙度随土壤含水量的变化较为剧烈.

2.2.3 冻融作用对生物结皮表面糙度的影响 一般认为, 冻融过程对土壤结构有一定的破坏作用, 从而可能影响生物结皮表面糙度. 由图6可见, 在生物结皮冻融过程中, 其表面糙度呈逐渐增大趋势. 就浅色藻结皮而言, 第1次冻融后结皮表面糙度的增加幅度达到10.2%, 差异显著; 经过第2次冻融后, 其表面糙度较冻融前增加29.7%, 较第1次冻融后显著增加. 就深色藻结皮、混生结皮和苔藓结皮而言, 第1次冻融后, 其表面糙度几乎不变, 差异不显著; 第2次冻融后的表面糙度指数较冻融前分别增加23.4%、22.2%和24.6%, 较第1次冻融后显著增加. 表明冻融作用可以增加生物结皮表面糙度, 增加程度与结皮类型有关. 生物结皮发育初期(浅色藻结皮)的表面糙度更易受到冻融作用的影响; 随着生物结皮发育, 深色藻结皮、混生结皮和苔藓结皮需经反复冻融后对其表面糙度的影响才有所体现.

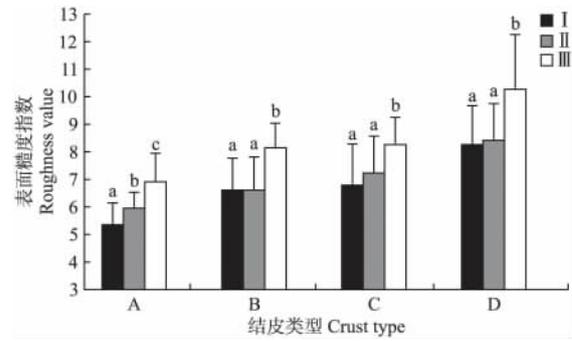


图6 反复冻融条件下不同类型生物结皮表面糙度

Fig. 6 Roughness of biocrusts with different biological composition under the freezing and thawing (mean ± SE).

I: 冻融前 Prior to freezing and thawing; II: 冻融一次后 After first freezing and thawing; III: 冻融两次后 After second freezing and thawing.

2.2.4 土壤理化性质对生物结皮表面糙度的影响 本研究在风干条件下, 用野外PVC管采集不同类型生物结皮原状土样, 结合各项调查指标和土壤物理性指标, 对不同类型生物结皮表面糙度进行相关性分析. 苔藓结皮盖度、苔藓生物量、结皮层有机质、下层有机质、结皮层容重和结皮层粘结力的含量范围分别是 $(40.2 \pm 29.4) \%$ 、 $(2.1 \pm 1.9) \text{ g} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、 $(1.55 \pm 0.60) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.59 \pm 0.18) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(1.25 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $(0.76 \pm 0.10) \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$. 野外采回的各PVC管内部原状生物结皮的表面糙度以及苔藓结皮盖度、苔藓生物量调查数据的变异性较大, 因此在相关性分析时, 选用Pearson相关系数分别对生物结皮表面糙度与苔藓结皮盖度、苔藓生物量、结皮层有机质、下层有机质、结皮层容重和结皮层粘结力进行双侧相关性分析, 其P值分别为0.106、0.098、0.374、0.741、0.749和0.506.

由表5可以看出, 生物结皮表面糙度与苔藓结皮盖度呈显著正相关, 其相关性系数为0.414; 结皮表面糙度与苔藓生物量、结皮层有机质、下层有机质、结皮层容重和结皮层粘结力也呈正相关, 但未达到显著水平.

3 讨论

3.1 不同发育阶段生物结皮表面糙度特征

生物结皮在干旱、半干旱生态系统中有重要的生态功能. 目前, 人们对生物结皮表面糙度的研究极少, 仅Belnap^[37]在2006年基于土壤表面糙度将干旱半干旱地区的生物结皮进行分类. 土壤生物结皮表面并不平整, 进而影响地表糙度. 本研究在典型黄土丘陵区不同退耕年限的坡地上展开试验, 结果表明, 生物结皮表面糙度会随着生物结皮的发育呈

表 5 不同类型生物结皮表面糙度与土壤性质的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of the roughness of biocrusts with different biological composition and soil properties

项目 Item	苔藓结皮盖度 Bryophyte coverage (%)	苔藓生物量 Bryophyte biomass ($g \cdot dm^{-2}$)	结皮层有机质 Biocrust organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	下层有机质 Soil organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	结皮层容重 Biocrust bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	结皮层粘聚力 Biocrust cohesion ($kg \cdot cm^{-2}$)
表面糙度 Roughness	0.414*	0.513	0.23	0.087	0.084	0.173

* $P < 0.1$.

先减后增的趋势,最后趋于稳定.这与 Rodríguez-Caballero 等^[21]的研究结果相似.此外,由于生物结皮生物量会随其发育年限的延长而有所增加^[22],故不同类型的生物结皮亦可表征其不同的发育阶段.本研究在风干条件下于野外采取原状土样后,用链条法测定不同类型生物结皮表面糙度的变化(图 3),结果证实了生物结皮在发育过程初期显著降低了其表面糙度,在发育后期显著增加,最终趋于稳定的科学假设.

由于地表糙度测定所要求的精确度不同,不同的测定方法应运而生,包括接触式测定法(链条法和针测法)和非接触式测定法(三维激光扫描技术、红外技术和投影分析等).本研究采用链条法,主要是考虑到生物结皮对地表的保护作用 and 链条的材质,使链条与地表接触的过程中并不会产生扰动.此外,由于藓类枝叶的存在,使非接触式测定法的精度难以达到要求,并且非接触式测定法难以满足野外实地调查测定的要求.虽然该测定方法与真实情况可能有所偏差,但可在一定程度上反映野外真实情况.所测数据也可基本反映不同发育阶段及不同类型生物结皮表面糙度的变化情况.

本研究发现,生物结皮在发育初期,其表面糙度降低幅度较大,且随着结皮发育其表面糙度有所增加,最终趋于稳定.其原因可能在于研究区较大的降雨量(年均降雨量为 500 mm),且降雨较集中.雨滴的打击导致土壤表面结构被破坏,因而降雨一般会使得地表糙度值减小^[36,38].依据 Römken 和 Wang^[9]对地表糙度概括分类,其中,生物结皮表面糙度所处的变化范围属于由单个颗粒、大团聚体引起的微地形变化,其数量级变化为 1.0 mm,变化范围 0 ~ 2 mm.而这类地表糙度的产生和变化主要与侵蚀密切相关^[9].结皮发育初期退耕地表土壤由于侵蚀作用和雨滴的打击作用,地表趋于平整,此阶段发育而来的生物结皮为浅色藻结皮,其水平方向稳定性较低^[39],并不能很好地保护地表免于侵蚀,从而导致生物结皮发育初期的表面糙度明显降低.在发育后期,由于结皮的覆盖作用,使地表基本免于侵蚀,从

而保护了地表的凹凸起伏,其糙度有所增加.另外,由于研究区气候(年均降雨量为 500 mm,年均气温 8.8 °C)比较适合耐旱高等植物的生长,退耕后耐旱高等植物大面积发育,根系交织,可能促使地表糙度增加.但在生物结皮发育初期,高等植被并未发育,根系作用几乎没有,导致发育后期的表面糙度高于发育初期.

3.2 生物结皮发育过程中表面糙度的影响因子

3.2.1 坡向对生物结皮表面糙度的影响

在黄土丘陵区,不同坡向的太阳辐射量、水分蒸发量和土壤理化性质都存在一定差异,由此导致阴、阳坡的土壤侵蚀类型和强度也表现出较大差异^[40].本研究在调查过程中难以寻找理想样地,造成样地数目有限,结果可能有所偏差,但可以初步反映这一现象的存在.由图 5 可知,生物结皮发育进入其表面糙度稳定期后(结皮发育 10 年以上,逐渐由地表深色藻结皮转化为有大量藓类植物参与的地上生物结皮),其土壤含水量在变化幅度不大的情况下,水分对其表面糙度的影响不大.本研究调查时间为 2012 年 7 月至 2012 年 9 月,此时研究区降雨较为集中,南北坡向水分虽然存在分异,但变化幅度不大^[41].因而可能导致不同坡向的生物结皮表面糙度差异不显著.由表 5 可以看出,除苔藓结皮盖度外,其他土壤性质对生物结皮发育过程中表面糙度的影响并不明显.而此阶段生物结皮苔藓盖度在南北坡向上的分异较大,与最终结果存在偏差.这可能与野外实地测量表面糙度变异性较大,以及生物结皮发育过程中表面糙度还可能受到土壤侵蚀、高等植被生长和反复冻融作用等诸多因素的影响有关.这些因素都可能导致生物结皮发育进入表面糙度稳定期后,坡向对其影响并不显著.

3.2.2 不同生物类型的生物结皮表面糙度对水分的响应

生物结皮是变水植物,对含水量的变化反应敏感^[37].本研究是由湿到干测定生物结皮的表面糙度特征.由于试验条件的不同,受各种因素影响,本研究采用该方法之前反复进行预试验后发现,加水超过所需含水量的 5% 后静置至所测含水量时水分

分布基本均匀. 虽然该水分设置方法与真实情况可能有所偏差, 但可以从一定角度模拟野外真实情况. 本文所测数据可以基本反映不同类型生物结皮在不同含水量条件下表面糙度的差异及变化情况.

本研究结果表明, 随着水分梯度的变化, 不同类型生物结皮呈现出不同的变化. 土壤水分较高和/或较低时, 水分对生物结皮表面糙度的响应有所体现, 且生物结皮发育初期的表面糙度对水分的响应较为敏感. 原因可能在于: 浅色藻结皮水平方向稳定性较低^[39], 且对含水量的变化反应敏感^[37]. 苔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^[42]. 当结皮层含水量较高时, 藓结皮中的藓类枝叶铺展开, 凹凸不平, 从而导致结皮层表面糙度升高; 随着含水量的降低, 藓类铺展开的枝叶收缩, 凹凸状况逐渐平缓, 结皮层表面糙度逐渐降低; 当含水量降低到 30% 以下时, 藓类铺展开的枝叶继续收缩, 几近萎缩, 表面继而出现凹凸不平现象, 表面糙度升高. 藻结皮表面糙度随含水量的变化与藓结皮不同, 其原因可能与藻结皮的结构组成有关. 浅色藻结皮处于结皮发育初期易受外界环境的影响, 因而呈现出凹凸交错阶段变化较为剧烈的现象. 深色藻结皮表面糙度在田间持水量和风干条件下, 与其他含水量条件下的表面糙度存在显著性差异. 可能是由于随着水分的变化, 其生物活性、生物量会发生变化, 但考虑到其不存在藓类枝叶的展开与收缩, 导致其仅在水分过干和过湿的情况下存在显著性差异. 混生结皮由深色藻结皮和苔藓结皮组成, 其表面糙度特征是二者共同作用的结果.

3.2.3 不同发育阶段生物结皮表面糙度对冻融作用的响应

冻融作用对土壤物理性质的影响主要表现在水与冰转化过程中体积胀缩对土壤团聚结构的破坏. 在冻融交替条件下, 冻融过程对团聚体的物理破坏有累积作用, 对大团聚体破坏作用更为强烈^[43]. 因而在冻融交替作用下, 土壤内部大团聚体破坏可能会导致土壤表面的凹凸不平加剧、土壤表面糙度增加.

结皮覆盖于土壤表面, 土壤内部大团聚体的破坏可能会导致其表面糙度增加. 就浅色藻结皮而言, 发育初期其稳定性较低^[39], 易受外界环境的影响, 故浅色藻结皮表面糙度更易受到冻融作用的影响. 而生物结皮对土壤表面结构的稳定作用会随其生物量的增加而增加^[39], 加之藓类假根的缠绕、包裹作用对土壤表面结构的稳定性作用可能会比藻类通过胶鞘和分泌多糖对土壤表面结构的稳定性作用更

强^[44-45]. 这可能会导致浅色藻结皮首次冻融后的表面糙度显著增加, 而深色藻结皮、混生结皮和苔藓结皮需进行第 2 次冻融后, 其表面糙度才会显著增加.

3.2.4 土壤性质对不同类型生物结皮表面糙度的影响

本研究结果表明, 生物结皮表面糙度与苔藓结皮盖度呈显著正相关; 与苔藓生物量、结皮层有机质、下层有机质、结皮层容重和结皮层粘结力也呈正相关, 但相关性并不显著. 这可能是由于生物结皮层苔藓盖度和生物量到达一定水平时, 其各物理属性指标基本趋于稳定^[19], 导致随着苔藓盖度的增加, 土壤各物理属性指标变化不大. 不同类型生物结皮的表面糙度有所不同, 苔藓结皮的盖度亦可间接地反映生物结皮的生物组成. 由于本试验是野外原状土采样后测定, 与野外真实情况差异较小, 而测定指标变异性较大. 这也是导致该结果的原因之一.

4 结 论

本文以黄土丘陵区不同发育阶段的原状生物结皮为研究对象, 采用经典的链条法, 以表面糙度指数表征地表糙度, 研究了生物结皮发育过程中地表糙度的变化及其影响因子. 结果表明: 生物结皮显著改变地表糙度. 随着生物结皮从藻结皮向藓结皮演替, 其表面糙度先降低后增加, 生物结皮发育形成 10 年以后, 其表面糙度基本趋于稳定; 研究区早期形成的藻结皮表面糙度较裸土降低 47.0%, 深色藻结皮(藓类盖度 < 20%) 显著高于浅色藻结皮, 但仍较裸土低 20.4%, 混生结皮(藓类盖度 20% ~ 60%) 和苔藓结皮(藓类盖度 > 70%) 表面糙度与深色藻结皮基本一致. 生物结皮表面糙度进入稳定期后(结皮发育 10 年以上, 逐渐由地表深色藻结皮转化为有大量藓类植物参与的地上生物结皮), 坡向对地表糙度的影响基本不明显. 土壤水分影响地表糙度特征. 随着水分梯度的不同设置, 不同发育阶段的生物结皮呈现出不同的变化. 土壤水分较高和/或较低时, 水分对生物结皮表面糙度的响应有所体现. 生物结皮发育初期表面糙度随含水量变化较为剧烈. 深色藻结皮、混生结皮和苔藓结皮表面糙度随含水量变化较为平缓. 冻融作用使生物结皮表面糙度增加, 但对不同类型结皮的影响有所差异. 生物结皮发育初期表面糙度更易受到冻融作用的影响, 浅色藻结皮第 1 次冻融后结皮表面糙度的增加幅度达到 10.2%; 第 2 次冻融后其表面糙度较冻融前增加 29.7%. 之后随着生物结皮发育, 进入深色藻结皮发育阶段后, 冻融 1 次对其表面糙度的影响不大, 但反

复冻融后对其表面糙度的影响才有所体现。生物结皮表面糙度与苔藓结皮盖度呈显著正相关,与苔藓生物量、结皮层有机质、下层有机质、结皮层容重和结皮层粘结力也呈正相关,但相关性并不显著。

致谢 感谢中国科学院安塞水土保持综合试验站对本研究的大力支持。

参考文献

- [1] Burwell RE, Larson WE. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1969, **33**: 449 - 452
- [2] Moore DC, Singer MJ. Crust formation effects on erosion processes. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**: 1117 - 1123
- [3] Helming K, Roth CH, Wolf R, et al. Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*, 1993, **6**: 273 - 286
- [4] Cogo NP, Moldenhaver WC, Foster GR. Effect of crop residue, tillage-induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, **47**: 1005 - 1008
- [5] Abrahams AD, Parsons AJ. Determining the mean depth of overland flow in field studies of flow hydraulics. *Water Resources Research*, 1990, **26**: 501 - 503
- [6] Römken MJM, Helming K, Prasad SN. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 2001, **46**: 103 - 123
- [7] Johnson CB, Mannering JV, Moldenhaver WC. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, **43**: 772 - 777
- [8] Kuripers H. A relief-meter for soil cultivation studies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1957, **5**: 255 - 262
- [9] Römken MJM, Wang JY. Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1986, **29**: 429 - 433
- [10] Sadeghian MR, Mitchell JK. Response of surface roughness storage to rainfall on tilled soil. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1990, **33**: 1875 - 1881
- [11] Allmaras RR, Burwell RE, Holt RF. Plow-layer porosity and surface roughness tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1967, **31**: 550 - 556
- [12] Lyles L, Woodruff NP. Surface soil cloddiness in relation to soil density at time of tillage. *Soil Science*, 1961, **91**: 178 - 182
- [13] Lyles L, Woodruff NP. How moisture and tillage affect soil cloddiness for wind erosion control. *Agricultural Engineering*, 1962, **43**: 150 - 153
- [14] Zheng Z-C (郑子成), He S-Q (何淑勤), Wu F-Q (吴发启). An inquisition into surface roughness on slope farmland. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2004, **19** (1): 39 - 41 (in Chinese)
- [15] Song X-Y (宋向阳). The Relation of Soil Surface Roughness and Runoff Characteristic on Slope Farmland. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese)
- [16] West NE. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semiarid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, **20**: 179 - 223
- [17] Eldridge DJ, Greene RSB. Microbiotic soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, **32**: 389 - 415
- [18] Belnap J, Lange OL. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- [19] 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)
- [20] Xiao B (肖波). The Effects of Biological Soil Crust on Soil Hydrological Process in Wind-Water Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau, China. PhD Thesis. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, 2008 (in Chinese)
- [21] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Chamizo S, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion. *Geomorphology*, 2012, **145/146**: 81 - 89
- [22] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), 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* (生态学报), 2010, **30** (17): 4668 - 4675 (in Chinese)
- [23] Xiao B (肖波), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), et al. Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of northern Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (5): 1019 - 1026 (in Chinese)
- [24] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J (王全九), 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* (自然资源学报), 2006, **21** (3): 441 - 448 (in Chinese)
- [25] Xu J (徐杰), Bai X-L (白学良), Tian G-Q (田桂泉), et al. Ecological function of mosses in biotic crusts on fixed dunes on Tengger Desert and its relation with soil factors. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2005, **25** (2): 234 - 242 (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] Ali S. Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, **48**: 527 – 529
- [28] Fan W-B (范文波), Li X-J (李小娟). Determination the bulk density of biological soil crust by the method of coatings. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi* (山西水土保持科技), 2001(3): 9 – 10 (in Chinese)
- [29] Jeffries DL, Link SO, Klopatek JM. CO₂ fluxes of cryptogamic crusts. I. Response to resaturation. *New Phytologist*, 1993, **125**: 163 – 173
- [30] Xu M-X (许明祥), Liu G-B (刘国彬), Wen Z-M (温仲明), *et al.* Temporal and spatial variation of soil characters in small catchment of loess hilly areas. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2000, **20**(1): 21 – 23 (in Chinese)
- [31] Zhang Y-M (张元明), Cao T (曹 同), Pan B-R (潘伯荣). A study on bryophyte associated with formation of soil crust in south fringe of Gurbantungut Desert in Xinjiang. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2002, **22**(1): 18 – 23 (in Chinese)
- [32] Xu J (徐 杰), Bai X-L (白学良), Yang C (杨 持), *et al.* Study on diversity and binding-sand effect of moss on biotic crusts of fixed dunes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(4): 545 – 551 (in Chinese)
- [33] Chen ZS, Tsui CC, Hsieh CF. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. *Geoderma*, 2004, **123**: 131 – 142
- [34] Sigua GC, Coleman SW, Albano J, *et al.* Spatial distribution of soil phosphorus and herbage mass in beef cattle pastures: Effects of slope aspect and slope position. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**: 59 – 70
- [35] Fu BJ, Qiu Y, Wang J, *et al.* Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, **240**: 243 – 263
- [36] Onstad CA. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1984, **27**: 729 – 732
- [37] Belnap J. The potential roles of biological soil crust in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 2006, **20**: 3159 – 3178
- [38] Dexter AR. Effect of rainfall on the surface microrelief of tilled soil. *Journal of Terramechanics*, 1977, **14**: 11 – 22
- [39] Yang K (杨 凯), Zhao Y-G (赵允格), Ma X-X (马昕昕). Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 173 – 177 (in Chinese)
- [40] Ke S-J (可素娟), Wang L (王 玲), Dong X-N (董雪娜). Shrinkage of Yellow River Channel and its influence on the flood transmission. *Yellow River* (人民黄河), 1997(7): 18 – 22 (in Chinese)
- [41] Zhang R (张 瑞), Cao H (曹 华), Wang Y-Q (王云强), *et al.* Spatial variability of soil moisture and its influence factors in watershed of gully region on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2012, **19**(5): 52 – 58 (in Chinese)
- [42] 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
- [43] Fitzhugh RD, Driscoll CT, Groffman PM, *et al.* Effects of soil freezing, disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, 2001, **56**: 215 – 238
- [44] Zhang Y-M (张元明). The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2005, **50**(1): 42 – 47 (in Chinese)
- [45] Eldridge DJ, Leys JF. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion. *Journal of Arid Environments*, 2003, **53**: 457 – 466

作者简介 王媛,女,1988年生,硕士研究生.主要从事生物结皮表面糙度研究. E-mail: wangyuan1520@126.com

责任编辑 杨 弘