

陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的 空间特征及其影响因子

卜崇峰^{1,2}, 张朋¹, 叶菁², 孟杰¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院、水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 生物结皮是旱区普遍存在的活性地被物, 在生态系统中发挥重要的生态功能, 研究其发育特征与形成机理是有效管理和利用该资源的基础。退耕还林(草)工程实施以来, 黄土高原地区生物结皮大面积发育, 但相比荒漠地区, 相关的研究工作还较薄弱。生物结皮的发育具有过程的复杂性和空间的分异性, 诸多荒漠地区的研究结果不能直接外推至黄土高原地区。鉴于此, 论文选择黄土高原典型小流域, 通过全面调查和测算分析, 应用GIS软件, 探讨了生物结皮的空间特征及其影响因子。结果表明: ①流域内藓类共有2科8属13种, 狭网真藓、真藓、尖叶对齿藓分布最广; ②苔藓结皮占绝对优势, 面积为4.18 km², 占流域面积的60.7%, 主要分布在干扰少、侵蚀弱、水分好的梁峁坡或梁峁顶上; ③土壤、植被、坡向均对苔藓结皮的发育有显著影响。同黄土地相比, 沙地苔藓结皮的覆盖度高、呈连片分布。乔、灌植被下的生物结皮发育优于草本群落, 植被盖度对苔藓结皮产生先促进后抑制的作用(拐点约在覆盖度30%处)。总体上, 阴坡生物结皮的覆盖度、厚度均高于阳坡。

关键词: 水蚀风蚀交错区; 小流域; 苔藓结皮

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2014)03-0490-10

DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.03.012

生物结皮是由微生物、藻类、地衣、苔藓等生物及其代谢产物与土壤颗粒胶结而成的复合体。全球生物结皮的覆盖面积超过了陆地表面的35%, 部分地区可达地表活覆盖的70%以上^[1], 在旱区生态系统中发挥重要的生态功能。目前, 生物结皮的研究多集中在全球中纬度的荒漠地区。荒漠生物结皮在宏观分布上存在一定的差异性, 在个体沙丘表面亦有明显的选择性^[2], 其实质是生物对环境条件综合适应的一种生态表现^[3]。比如地衣结皮是冷沙漠主要的生物结皮类型^[4], 而苔藓结皮则是腾格里沙漠地区最为常见的生物结皮^[5]。不同的气候和下垫面条件对生物结皮的发育也有很大影响, 比如有研究表明, 结皮厚度与土壤黏粉粒含量呈正相关关系^[6]。实际上, 由于受一系列生物与非生物因素的共同作用, 生物结皮的形成发育、生物组成、生态功能等呈现明显的过程复杂性和空间分异性。因此, 某一地区、特定类型生物结皮的研究结果并不能直接外推至其它地域。

相比荒漠地区, 黄土高原具有特殊的地貌和土壤条件, 植被、气候等自然环境明显不同, 该区发育的生物结皮应有其独特性。随着退耕还林(草)工程的实施和推进, 人

收稿日期: 2012-07-17; 修订日期: 2013-06-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071192, 40701096); 中国科学院西部之光(B28013200); 西北农林科技大学科研专项(QN2009085)。

第一作者简介: 卜崇峰(1977-), 男, 陕西榆林人, 博士、硕士生导师, 主要从事生物土壤结皮与水土保持工程研究工作。E-mail: buchongfeng@163.com

为干扰活动(特别是放牧和陡坡耕种)不断减弱,生物结皮大面积发育并逐渐成为该区生态系统的重要组成部分^[7]。初步研究表明:该区苔藓结皮发育面积最为广泛(部分地块可达90%以上),具有显著改善土壤理化性状^[8-9]、增加降雨入渗、减少径流、减轻侵蚀的作用^[10-11]。但总体上,黄土高原相关的研究工作起步较晚,加强该区生物结皮的发育机理与空间分布研究具有重要的理论意义。

本研究选取黄土高原北部水蚀风蚀交错区的六道沟小流域,通过典型地块的调查及相关指标的测算,利用GIS软件,了解生物结皮的生物组成和空间分布特征,并探讨土壤质地、植被类型、地貌坡向等对生物结皮的影响。旨在推进该区生物结皮的研究工作,为该资源的科学管理与高效利用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于陕西省神木县以西14 km处的六道沟小流域(110°21'~110°23'E, 38°46'~38°51'N),海拔1 094~1 274 m,流域面积6.89 km²,主沟道南北走向,长4.21 km,属窟野河二级支流。地处黄土高原向毛乌素沙地、森林草原向干旱草原的过渡地带,属流水侵蚀作用向干燥剥蚀作用过渡的典型水蚀风蚀交错带,年侵蚀模数达10 000 t/km²^[12]。气候属中温带半干旱气候,冬春季干旱少雨多风沙,风蚀严重,夏秋多雨且暴雨频繁,水蚀强烈。年均气温7~9℃,盛行风向为NW,年平均风速为2.2 m/s;年均降雨量400 mm,其中6—9月的降雨量约占全年的70%~80%^[13]。流域内的主要植被有柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd) Novopokr)和茺蒿(*Artemisia giraldii* Pamp.)等。流域东侧主要为黄土覆盖,占流域面积的86.5%;西侧多为固定沙丘,占流域面积的13.5%^[14](图1)。

1.2 调查方法

2009年8—10月在全流域开展了生物结皮的空间调查工作。根据土地利用方式确定了调查样地11个(表1),包括沙地样地4个、黄土样地7个。每个样地布设3~7个样方,草本、灌木、乔木样方规格分别为1 m×1 m、5 m×5 m、10 m×10 m。测算每个样方内生物结皮的相关指标,并抽取了其中的37份生物结皮作为藓种鉴定的供试样品,同时记录所在地块的土壤、植被(群落组成与覆盖度)、地形地貌等环境状况。

1.3 指标测算

测算每个样方内生物结皮的覆盖度、厚度等指标。覆盖度(%)采用方格法测算;厚度(mm)用游标卡尺进行原位测定;抗剪

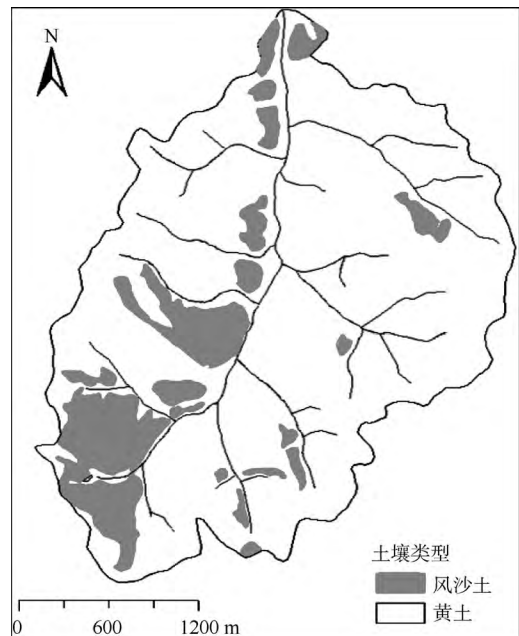


图1 研究区六道沟小流域示意图

Fig. 1 The sketch map of Liudaogou watershed on the Loess Plateau

表1 六道沟小流域生物结皮调查样地概况

Table 1 The overview of sample plot of biological crusts survey in Liudaogou small watershed

编号	重复次数	植被类型	土壤类型	坡向	发育年限	伴生植被
1	3	杨树林地	黄土	阴坡	16	沙蒿(<i>Artemisia arenaria</i> Spreng)、柠条、铁杆蒿(<i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.)、沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i> Pall.)、阿尔泰狗娃花、米口袋(<i>Gueldenstaedtia multiflora</i> Bge.)、女娄菜(<i>Melandrium apricum</i> (Turcz.) Rohrb.)、草木樨状黄芹(<i>Astragalus melilotoides</i> Pall.)、白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng)、达乌里胡枝子、硬质早熟禾(<i>Poa sphondylodes</i> Trin.)
2	3	柠条林地	黄土	阴坡	15	沙蒿、女娄菜、赖草(<i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel.)、草木樨状黄芹、长芒草、达乌里胡枝子、无芒隐子草(<i>Cleistogenes songorica</i>)
3	7	长芒草地	黄土	阴坡 半阴坡 阳坡	30	硬质早熟禾、远志(<i>Polygala tenuifolia</i> Willd.)、棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>)、无芒隐子草、白羊草、达乌里胡枝子、苜蓿(退化中)、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花、草木樨状黄芹、芡蒿、柠条
4	3	苜蓿地	黄土	阴坡	15	长芒草、猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)、蒺藜(<i>Tribulus terrestris</i> L.)、田旋花(<i>Convolvulus arvensis</i>)、狐尾草(<i>Alopecurus pratensis</i>)、无芒隐子草、狭叶米口袋(<i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> Bunge)、草木樨状黄芹
5	5	荒草地	黄土	半阴坡	10	草木樨状黄芹、达乌里胡枝子、硬质早熟禾、铁杆蒿、长芒草、大叶章(<i>Deyeuxia langsdorffii</i> (Link) Kunth)、米口袋、狭叶米口袋(<i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> Bunge)、无芒隐子草、白羊草、阿尔泰狗娃花、猪毛蒿
6	3	退耕地	黄土	半阴坡	10	达乌里胡枝子、长芒草、草木樨状黄芹、阿尔泰狗娃花、猪毛蒿、狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv)、无毛隐子草、硬质早熟禾、沙葱(<i>Allium mongolicum</i> Bgl)
7	4	杏树地	黄土	半阴坡	8	草木樨状黄芹、狗尾草、达乌里胡枝子、大戟(<i>Euphorbia peginensis</i>)、远志、阿尔泰狗娃花、大叶章、刺沙蓬(<i>Salsola ruthenica</i> Iljin)、猪毛蒿、硬质早熟禾
8	3	沙蒿地	沙土	阴坡	15	沙蒿、柠条、沙柳(<i>Salix psammophila</i>)、草木樨状黄芹
9	2	沙柳地	沙土	阴坡	15	草木樨状黄芹、阿尔泰狗娃花、硬质早熟禾、米口袋、沙蒿
10	1	小叶杨	沙土	半阴坡	16	柠条、沙柳
11	1	柠条	沙土	阴坡	30	黄蒿(<i>Artemisia annua</i> L.)、狗尾草、达乌里胡枝子、远志、阿尔泰狗娃花、无芒隐子草

强度 (kPa) 用袖珍剪力仪 (BWT2XZJL) 原位测定; 容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 采用涂膜法测定^[15]。厚度、抗剪强度测定重复 10 次, 容重复 3 次。

由于苔藓结皮是流域内发育稳定且居于绝对主导地位的生物结皮类型, 藻类仅处于附属地位, 混生于藓类中。因此, 本研究把藓类植物作为主要的研究对象, 将采集的 37 份苔藓结皮样品带回实验室, 首先在干燥条件下观察植物体、叶片着生和分枝情况, 然后经湿润在解剖镜下观察叶片伸展情况并进行解剖, 在光学显微镜下对各项特征进行观

察和记录。依据相关文献及工具书^[16-19], 将藓植物鉴定到种。

基于六道沟流域的DEM、植被类型、土地利用等基础图件, 利用GIS 9.3软件的空间分析和缓冲区功能, 将11个调查地块的生物结皮属性值赋予流域内具有相同植被类型的地块, 得到生物结皮空间分布图, 相关统计在SAS v8软件中完成。

2 结果与讨论

2.1 苔藓结皮的物种组成

鉴定结果表明, 流域内共发现藓类植物2科8属13种^[20] (表2)。其中, 丛藓科占6属8种, 且以对齿藓属所占种数最多, 分别为尖叶对齿藓、黑对齿藓、硬叶对齿藓尖叶变种3种; 真藓科占2属5种, 其中真藓属有4种藓类, 分别为真藓、狭网真藓、丛生真藓和宽叶真藓。从藓类的分布情况来看, 狭网真藓、真藓、尖叶对齿藓在流域内分布最广, 为组成生物结皮的优势藓种, 其次是芦荟藓和北地扭口藓以及黑对齿藓。盐土藓、厚肋流苏藓、硬叶对齿藓尖叶变种、丛生真藓的分布范围相对较小, 净口藓、宽叶真藓、平蒴藓则为偶见种, 仅出现在个别样本中。

表2 苔藓结皮的藓类植物组成鉴定结果
Table 2 Mosses composition in moss-dominated BSCs

科	属	种
		尖叶对齿藓(<i>Didymodon constrictus</i> (Mitt.) Saito)
	对齿藓属(<i>Didymodon</i>)	黑对齿藓(<i>Didymodon nigrescens</i> (Mitt.) Saito)
		硬叶对齿藓尖叶变种(<i>D.rigidulus</i> Hedw. var. <i>ditrichoides</i> (Hedw.) Zand.)
丛藓科 (Pottiaceae)	扭口藓属(<i>Barbula</i>)	北地扭口藓(<i>Barbula fallax</i> Hedw.)
	芦荟藓属(<i>Aloina</i>)	芦荟藓(<i>Aloina rigida</i> (Hedw.) Limpr.)
	流苏藓属(<i>Crossidium</i>)	厚肋流苏藓(<i>Crossidium crassinerve</i> (De Not.) Jur.)
	净口藓属(<i>Gymnostomum</i>)	净口藓(<i>Gymnostomum calcareum</i> Nees et Hornsch.)
	盐土藓属(<i>Pterygoneurum</i>)	盐土藓(<i>Pterygoneurum subsessile</i> (Brid.) Jur.)
		真藓(<i>Bryum argenteum</i> Hedw.)
真藓科 (Bryaceae)	真藓属(<i>Bryum</i>)	丛生真藓(<i>Bryum caepiticium</i> Hedw.)
		狭网真藓(<i>Bryum algovicum</i> Sendt.)
		宽叶真藓(<i>Bryum funkii</i> Schwaegtr.)
	平蒴藓属(<i>Plagiobryum</i>)	平蒴藓(<i>Plagiobryum zierii</i> (Hedw.) Lindb.)

2.2 苔藓结皮的空间分布

2.2.1 覆盖度的空间特征

GIS分析表明: 流域内苔藓结皮主要分布于梁峁坡或梁峁顶上, 面积为4.18 km², 占流域面积的60.7%。图2(a)展示了苔藓结皮的覆盖度空间分布状况。可以看出, 苔藓结皮覆盖度介于60%~70%的面积最大, 为2.01 km², 占苔藓结皮总面积的48.1%; 覆盖度在50%~60%之间的为0.99 km², 占苔藓结皮总面积的23.7%; 覆盖度<50%和介于70%~80%之间的面积相当, 分别占苔藓结皮总面积的10.3%和11.4%; 覆盖度>80%的面积最小, 仅占苔藓结皮总面积的6.5%。结合土壤类型分布情况(图1)显示, 苔藓结皮的覆盖度与土壤类型密切相关, 沙地上的苔藓结皮覆盖度普遍较大。

2.2.2 厚度的空间特征

同覆盖度的分析方法,应用GIS的空间分析和缓冲区功能,将各样方生物结皮的厚度测算值拓展至全流域,得图2(b)。结果显示,苔藓结皮最小厚度为5.5 mm,最大20.0 mm;厚度介于10.0~12.5 mm之间的苔藓结皮占总面积的58.2%;<10.0 mm的苔藓结皮则占总面积的33.0%。厚度在17.5~20 mm之间的苔藓结皮占总面积的6.2%,主要分布于流域西侧的固定沙地上。

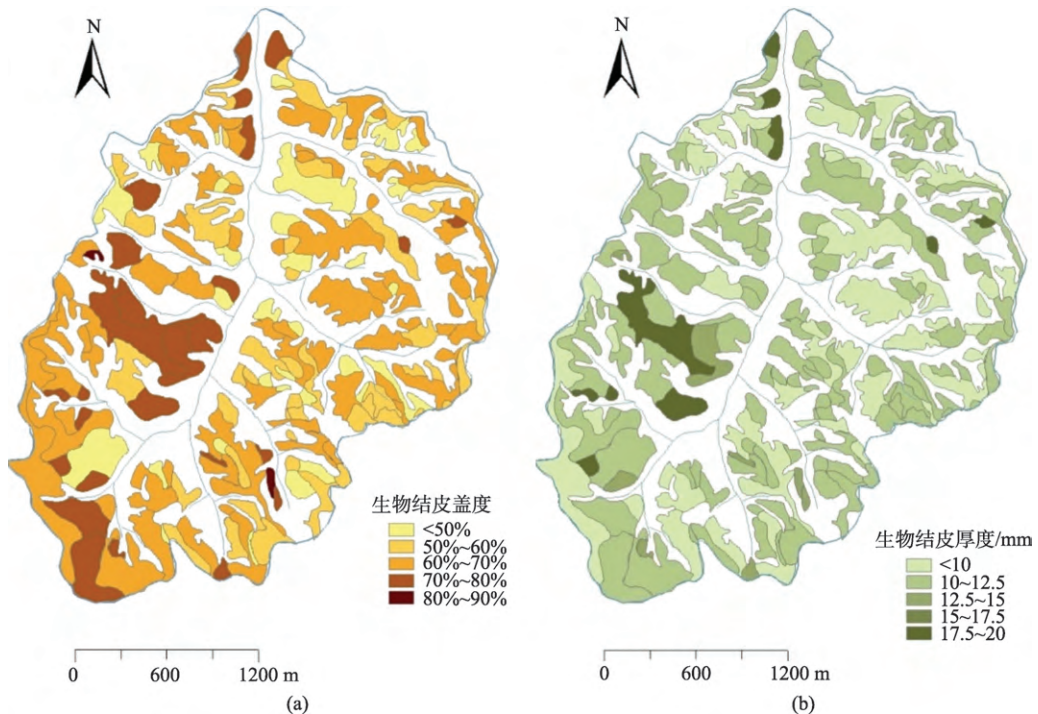


图2 六道沟流域苔藓结皮的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of moss crust in Liudaogou watershed

2.3 苔藓结皮空间分布的影响因子

2.3.1 土壤类型

调查发现,流域内无论沙地还是黄土地,都有良好的生物结皮发育,且以苔藓结皮为主。沙地生物结皮主要分布于背风坡和水分条件较好的坡下或丘间地,多连片发育;黄土地生物结皮主要分布于植物群落间空地,枯落物覆盖较多的植物基部生物结皮的发育受到明显限制,仅局部地区连接成片,景观上多呈斑块状分布。

土壤是生物结皮发育的物质基础,土壤质地、理化性质对其分布、组成、结构及功能等具有显著影响^[21-23]。直观上看,两种土壤基质上发育的生物结皮在藓种组成及结构上均有明显的不同(图3)。分析表明:沙地苔藓结皮的覆盖度(78%)明显高于黄土地(57%),平均厚度(13.7 mm)大于黄土地(10.6 mm),厚度较为均匀($C_r=13.3%$);分析认为,沙土生物结皮多分布于地势平缓的地段,局部沙区结皮厚度较为一致,而在大范围区域结皮厚度的变异主要是由于发育程度不同所致;黄土地生物结皮分布范围更广,但可能受微地形、水蚀冲刷、干扰的影响,加之结皮层与下伏土壤不易分离,其厚

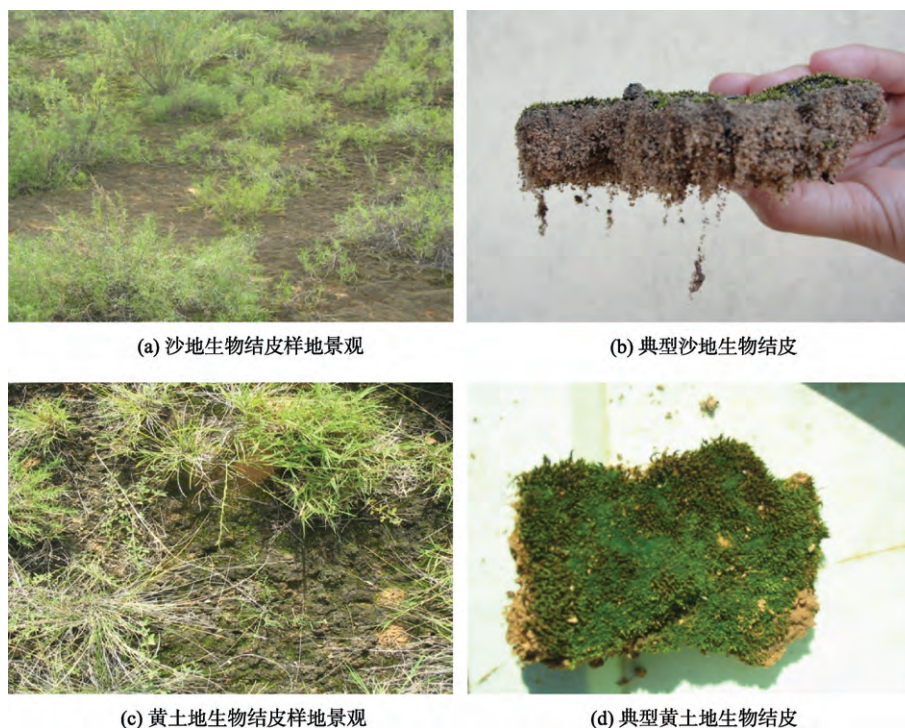


图3 六道沟流域不同土壤类型苔藓结皮的分布和发育特征

Fig. 3 Distribution and development characteristics of different BSCs in Liudaogou watershed

度均匀性较差 ($C_v=22.3\%$)。另外, 受土壤类型的影响, 沙土生物结皮的平均容重大于黄土地生物结皮, 分别为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 而其变异系数则分别为 6.8% 和 14.4%, 这也表明黄土地生物结皮发育程度差异相对较大。

2.3.2 植被类型与盖度

植被通过改变近地面空气湿度、光照、温度、水分等, 对生物结皮的形成发育产生重要影响。有关维管植物与生物结皮之间的关系, 国内外的研究结果还存在许多争议。本文以不同植被下黄土地苔藓结皮为例, 探讨植被与生物结皮之间的关系。表3显示, 不同植被下生物结皮的覆盖度情况差异很大。其中, 苜蓿地和小叶杨林下苔藓结皮的盖度最小, 介于 40% ~ 50% 之间。原因是流域内苜蓿覆盖度较大 (50% 左右), 而且地表枯落物较多, 对苔藓结皮的发育产生了不利影响; 而尽管小叶杨林的覆盖度不大 (20%),

表3 不同植被下苔藓结皮的盖度特征

Table 3 Coverage characteristics of BSC under different vegetation types

样地编号	植被类型	植被盖度/%	结皮盖度/%
1	猪毛蒿	28	57
2	草木樨状黄芹+猪毛蒿	29	66
3	苜蓿	50	43
4	长芒草	30	58
5	杏树	13	55
6	柠条	31	68
7	小叶杨	20	50

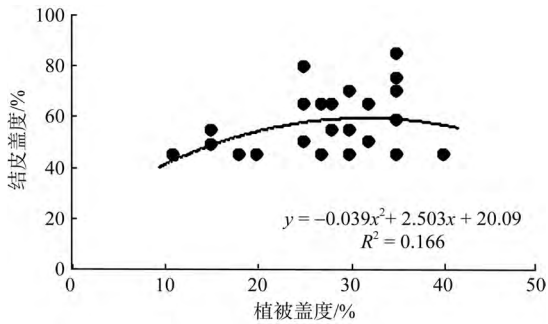


图4 苔藓结皮覆盖度与植被的关系

Fig. 4 Relationship between BSC coverage and vegetation coverage

低时 (<30%), 苔藓结皮盖度与之正相关; 而当植被盖度较高时 (>30%), 苔藓结皮盖度呈下降趋势。卢晓杰等^[24]发现, 当环境条件适合植被大量生长繁衍时, 植被盖度与生物结皮盖度呈极显著负相关 ($R=-0.920$, $P<0.05$)。原因是, 生物结皮是生态演替的先锋拓殖种, 同时它为维管植物的定居创造有利条件, 而随着维管植被逐渐稳定, 其先锋作用不断削弱, 进而出现随植被盖度增加生物结皮盖度下降的现象。需要注意的是, 本研究中植被盖度相对较小且比较集中, 导致数据分布不均匀, 因此所得结果还有待今后进一步研究加以验证。

2.3.3 坡向

为探讨坡向对生物结皮的影响, 本研究选取了退耕 30 a 自然演替而成的长芒草样地, 以保证植被覆盖状况与生物结皮发育最接近。分别调查测算了阴坡和阳坡生物结皮的发育特征。结果表明: 长芒草盖度相差不大的情况下 (约 30%), 苔藓结皮覆盖度明显表现为阴坡>阳坡, 平均值分别为 73% 和 46%。苔藓结皮的厚度、抗剪强度和容重计算结果 (表 4) 显示: 不同坡向苔藓结皮的厚度和容重均具有统计学差异, 阴坡苔藓结皮的厚度极显著高于阳坡 ($P<0.01$), 而容重却极显著低于阳坡 ($P<0.01$); 苔藓结皮抗剪强度则表现为阳坡略大于阴坡, 但统计上差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。由此可见, 坡向对苔藓结皮的发育具有显著的影响。究其原因: 不同坡向水分、养分条件差异较大, 一般为阴坡优于阳坡^[25-26], 这为生物结皮中藓类植物创造了良好的生长条件, 因此阴坡上结皮的盖度、厚度均显著高于阳坡; 而受太阳辐射较多的阳坡, 水分和养分条件相对较差, 不利于苔藓植物生长, 由于土壤水分蒸发强烈, 地表相对干燥, 结皮硬度较大, 因此抗剪强度表现为阳坡略大于阴坡。黄土高原藻类结皮的研究结果与此类似^[27]; 通过生物结皮光合作用的测算, 赵允格等^[28]也推断黄土区生物结皮的发育阴坡优于阳坡, 藓类

表 4 不同坡向苔藓结皮的厚度、抗剪强度和容重的差异

Table 4 Differences in thickness, bulk density and shear strength of biological soil crust at different slope aspects

评价指标	阴坡		阳坡		t 检验
	平均值	标准误	平均值	标准误	
厚度/mm	13.3	0.6	9.2	0.3	-6.40**
抗剪强度/kPa	23.8	1.5	26.5	1.2	1.43 ^{n.s}
容重/(g·cm ⁻³)	0.96	0.03	1.26	0.02	7.54**

注: **表示差异极显著 ($P<0.01$); n.s 表示差异不显著 ($P>0.05$)。

但林下厚重的枯落物层严重阻碍了苔藓结皮的形成, 仅林间空地有部分生物结皮发育。猪毛蒿、长芒草、杏树群落下苔藓结皮的覆盖度相差不大, 平均盖度变化范围为 55% ~ 58%。草木樨状黄芪+猪毛蒿群落和柠条群落下生物结皮的覆盖度最大, 分别为 66% 和 68%, 主要原因是这两种植物群落下植被盖度均较低 (29%、31%), 枯落物也相对较少。

图 4 展示了植被盖度与苔藓结皮覆盖度之间的关系。可以看出, 当植被盖度较

植物更多地分布在阴坡。可见, 坡向对生物结皮发育和演替具有显著影响, 势必导致其生态功能的差异。

3 主要结论

流域内生物结皮广泛发育, 并以苔藓结皮居于主导地位。组成苔藓结皮的藓植物共有2科8属13种。其中, 丛藓科8种并以对齿藓属种数最多; 真藓科5种, 以真藓属种数最多。狭网真藓、真藓、尖叶对齿藓是分布最广泛的优势藓种, 其次是芦荟藓、北地扭口藓以及黑对齿藓。盐土藓、厚肋流苏藓、硬叶对齿藓尖叶变种、丛生真藓的分布较少, 净口藓、宽叶真藓、平蒴藓为偶见种。

流域内苔藓结皮主要分布在梁峁坡或梁峁顶, 在干扰少、侵蚀弱、水分好的地块发育最好。苔藓结皮面积为4.18 km², 占流域面积的60.7%。覆盖度介于60%~70%的苔藓结皮面积最大(2.01 km²), 占总面积的48.1%; 覆盖度>80%的面积最小, 仅占总面积的6.5%。苔藓结皮最小厚度为5.5 mm, 最大20.0 mm; 厚度介于10.0~12.5 mm之间的占总面积的58.2%; <10.0 mm的占总面积的33.0%。厚度在17.5~20 mm之间的占总面积6.2%, 主要分布于流域西侧的沙地上, 且覆盖度普遍高于黄土地。

土壤、植被、坡向均对生物结皮的发育有显著影响。沙地苔藓结皮面积大、均匀性好且多连片分布; 黄土地苔藓结皮多成斑块状分布, 均匀性较差。沙地苔藓结皮的平均覆盖度、厚度和容重均明显高于黄土地苔藓结皮。植被盖度高、林下枯落物少、水分条件好的地块有利于苔藓结皮的发育形成, 但苔藓结皮与植被盖度并非呈单一的线性正相关。总体上, 苔藓结皮的发育优劣顺序为: 乔、灌>多年生草本>一年生草本。坡向通过影响光照、水分等状况, 对苔藓结皮的发育产生显著影响。苔藓结皮的覆盖度、厚度均明显表现为阴坡>阳坡, 容重与之相反, 且均达到统计学极显著差异水平($P<0.01$)。

参考文献:

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 471-479.
- [2] Chen Jin, Zhang Yuanming, Tamura M, et al. A new index for mapping lichen-dominated biological soil crust in desert area [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 165-175.
- [3] Kidron G D, Barzilay E, Sachs E. Microclimate control upon soil microbiotic crusts, western Negev Desert, Israel [J]. *Geomorphology*, 2000, 36: 1-18.
- [4] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1 (5): 181-189.
- [5] 苏延桂, 李新荣, 贾荣亮, 等. 腾格里沙漠东南缘苔藓结皮对荒漠土壤种子库的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (3): 504-508.
- [6] 郭铁瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质的研究 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 135-139.
- [7] 赵允格, 许明详, 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.
- [8] 孟杰, 卜崇峰, 赵玉娇, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1864-1874.
- [9] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1316-1326.

- [10] 李莉, 孟杰, 杨建振, 等. 不同植被下生物结皮的水分入参与水土保持效应 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 105-109.
- [11] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤水分入渗能力的影响 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40.
- [12] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究 [J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 321-327.
- [13] 李勉, 李占斌, 刘普灵, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 63-65.
- [14] 贾恒义, 雍绍萍, 王富乾. 神木地区的土壤资源 [C]// 中国科学院西北水土保持研究所集刊. 1993, 18: 36-46.
- [15] 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.
- [16] 白学良. 内蒙古苔藓植物志 [M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1997: 199-226.
- [17] 陈邦杰. 中国苔藓植物属志: 上册 [M]. 北京: 科学出版社, 1963: 173-227.
- [18] 高谦. 中国苔藓志: 第二卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 113-261.
- [19] 高谦. 中国苔藓志: 第四卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征 [J]. 自然自然学报, 2014, 29(1): 67-79.
- [21] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24.
- [22] 刘利霞, 张宇清, 吴斌. 生物结皮对荒漠地区土壤及植物的影响研究述评 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 106-112.
- [23] 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.
- [24] 卢晓杰, 张克斌, 李瑞. 北方农牧交错带生物结皮的主要影响因子探讨 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 1-4.
- [25] 刘春利, 邵明安, 张兴昌, 等. 神木水蚀风蚀交错带退耕坡地土壤水分空间变异性研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 132-135.
- [26] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
- [27] 吕建亮, 廖超英, 孙长忠, 等. 黄土地表藻类结皮分布影响因素研究 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 11-14.
- [28] 赵允格, 许明祥, Jayne Belnap. 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 [J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4668-4675.

Spatial Characteristics of Moss-Dominated Soil Crust and Its Impact Factors in Small Watershed in Wind-Water Erosion Crisscross Region, Northern Shaanxi Province, China

BU Chong-feng^{1,2}, ZHANG Peng¹, YE Jing², MENG Jie¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Biological soil crusts (BSCs) are a widespread ground living cover in arid and semi-arid areas, which serve as an important ecological function in ecosystems of arid areas. To study its development characteristics and formation mechanism is the basis of effective management and utilization of these resources. Since the implementation of Grain for Green Project, the ecosystem of the Loess Plateau recovered extensively, and BSCs widely developed. However, the related researches are still deficient compared to those in the desert area. Due to the complexity of BSCs' development process and its spatial differentiation, many results of researches carrying out in desert areas can not be directly extrapolated to the loess area. In view of this, this paper chose a typical small watershed in the Loess Plateau, carried out a comprehensive survey, made lots of calculation and analysis by using GIS software, discussed the distribution characteristics of the BSCs and its influencing factors. The results showed that: 1) a total of 13 species of mosses belonging to eight genera under two families were found in the watershed. Of which *Bryum algovicum* Sendt., *Bryum argenteum* Hedw. and *Didymodon constrictus* (Mitt.) Saito. are most widely distributed. 2) Moss crust had the absolute advantage with an area of 4.18 km², accounting for 60.7% of the watershed area, which are mainly distributed on the hill slope or slope top for less erosion or less disturbance, and better soil water conditions. 3) Soil, vegetation and slope aspect had a significant effect on the development of BSCs. Compared with the loess area, BSCs in sandy area had a high coverage and showed a continuous distribution. The development of BSCs under the tree and shrub vegetation was superior to those under herbaceous communities, and the vegetation coverage promoted first and then inhibited the development of BSCs (inflection point at 30% of the coverage). Overall, the coverage and thickness of the BSCs were greater on shady slope than those on sunny slope.

Key words: wind-water erosion crisscross region; small watershed; moss-dominated soil crusts