

文章编号:1000-694X(2001)01-0004-08

干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展

李新荣¹, 贾玉奎², 龙利群¹, 王新平¹, 张景光¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠试验研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国林科院沙漠林业试验中心, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: 土壤微生物结皮广泛存在于干旱半干旱地区, 且具有重要的生态学意义。文章对微生物结皮的形成、发育过程的特点, 以及它对微生境的影响, 包括对土壤理化性质、风蚀水蚀的抗性、土壤水分时空分布特点、养分及微量元素地球生物化学循环等土壤学过程和对植被的影响与作用等方面的国内外研究进展进行了综述, 并对一些有争议研究结论进行了分析; 探讨了土壤微生物结皮在中国干旱沙漠地区生态恢复中的地位及作用。

关键词: 干旱半干旱地区; 土壤微生物结皮; 生态过程; 土壤过程

中图分类号: S154.36 **文献标识码:** A

微生物结皮是苔类、叶苔、蓝绿藻、地衣类、真菌和细菌, 以及许多景观中的常见的非维管束植物成分形成的十分复杂的聚合物^[1]。它不仅在温带和热带荒漠有分布, 而且在潮湿地区甚至在极地也有发现。此外, 它与其它土壤表层特征如维管束植物层^[2,3]、雨水作用形成的结皮和沉积物结皮^[4]有着本质的区别, 其主要表现在它是生物器官参与形成的^[5], 以及在对降水入渗、密度、土壤保水力与化学特性等方面的差异^[4]。随着全球气候变化和人口剧增, 实现干旱半干旱地区农牧业及生态环境的可持续发展已成当务之急, 因此微生物结皮这一特殊的景观属性重新引起了人们的广泛关注^[6]。本文综述了国内外有关这一领域的研究动态, 总结了微生物结皮在干旱半干旱地区的生态功能和地位, 提出了利用这一资源的建议和对策。

1 微生物结皮的特点及分布

1.1 微生物结皮及其分布

对土壤结皮中的生物成分的描述, 早期的研究有许多在术语方面的争议^[6]。其中隐花植物(cryptogam)常被传统的用作描述非维管束植物的术语, 即那些与表土层相关联的缺少韧皮部和木质部的植物。为了与非生物结皮加以区分, 术语隐花植物和

隐花植物结皮得到了应用, 特别是得到了土壤学家和地貌学家的认可。然而生物学家和生态学家更倾向于使用微生物(microbiota)和微生物结皮(microbiotic crust), 因为它强调了结皮中微小有机体的自然属性, 同时也包含了真菌、藻类和细菌等^[6]。

微生物普遍分布在自然界中, 几乎在所有的干旱半干旱区, 包括南极洲都有分布^[7]。我国学者张宪武等^[8,9]、陈祝春等^[10,11]和朱志诚等人^[12]曾详细地分析了结皮中的菌类组成, 认为沙坡头和毛乌素沙地结皮土样中微生物以细菌和放线菌为优势种, 霉菌较少。由于地表干旱贫瘠, 芽孢杆菌接近50%, 其具有粘性荚膜, 胶质鞘或厚的果胶质外壁, 有的分泌大量的粘液, 这些具有粘性附属物的菌体和粘性质液, 是构成结皮的基础, 加之放线菌和霉菌的菌丝, 使细的沙粒和微生物及其分泌物紧密地结合在一起, 构成复杂而具有一定韧性的结合体, 使沙土表层形成皮壳状结皮。然而, 由于野外对细菌、真菌和藻类的分类和鉴定的困难, 考虑到便于野外观察, 许多研究中所涉及的微生物结皮成分只包括苔藓、叶苔、地衣、蓝绿藻和地衣类等。

苔藓类和叶苔在一起统称为苔藓植物。虽然它们在地面的覆盖差异较大, 但其不能形成真正的结皮^[13]。一些苔藓在相对疏松的沙丘土上生长良好, 这主要是它们能够形成地下密集的网状茎的原因。

收稿日期:2000-05-10; 改回日期:2000-08-29

基金项目:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新课题(210031和210048);“九五”特别资助项目(KZ95T-04);沙坡头开放站基金(200025)联合资助

作者简介:李新荣(1966—),男(汉族),甘肃武山人,研究员,博士生导师,从事干旱区植物生态学研究。

因此,它们对土壤特别是沙土的稳定性具有重要的意义。土壤因子,特别是 pH 值和粘粒的含量对苔藓的分布会产生影响^[14]。Anderson 等人^[15]的研究表明,随着底土层中粘粒含量的增加,苔藓的丰富度和种的多样性也在增多。在澳大利亚东部风蚀半干旱地区,Downing 和 Sekirk^[16]发现苔藓在排水较好,pH 值较低,稳定性不高的沙丘上盖度较低。

地衣是藻类和菌类之间的一种共生关系形成的,每一形式的联合都形成一种特殊的地衣。其发育较苔藓和叶苔更缓慢,且喜欢干扰少,相对稳定的土壤。土壤性质,如钙的含量对一些种的繁育有抑制作用,pH 值对一些种的分布也有影响。此外,地衣的分布还受气候格局特征的影响,尤其是降水量与降水的分配^[17]。在一些地区,夏季降水稀少,而菌体在高温下生存是危险的。Rogers^[17]解释了限制地衣 *Chondropsis* sp. 在澳大利亚东部分布的原因,它仅分布在冬季降水集中的一些地区,夏季降水的增多会导致地衣盖度的减少。根据全球变暖和温室效应假说推论,这一现象将促使在地衣的损失中增加了蓝绿藻的竞争优势^[18]。由于地衣的发育还决定于景观的稳定性如何,因此,它可作为生态环境变化的指示生物。

藻类是微生物结皮组成中易观察到的最小的成分,在澳大利亚半干旱草场的结皮中它紧贴地衣和菌类,以共生的方式出现。藻类喜欢碱性土壤(对碱性土壤有选择性),对微环境的变化,如经常性的风蚀、水蚀和放牧干扰等更具有忍耐力^[1]。Eldridge 和 Greene^[6]按形态特征将微生物结皮划分为 3 种形式:即地上(hypermorphic)微生物结皮、地面(perimorphic)生物结皮和隐态(cryptomorphic)(地下生物结皮)(图 1)。地上结皮包括苔藓和叶苔,它

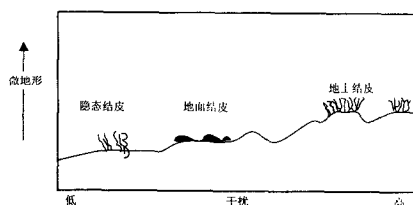


图 1 不同类型的微生物结皮在土壤表面的分布(仿 Eldridge 等, 1994)

Fig. 1 The distribution of microbiotic crust in different forms on soil surface

们多发生在半干旱区的微环境,比如在灌丛下面,经常与藻类相关联。这些结皮在具有明显微地貌的景观中分布更为普遍,且对放牧等干扰敏感,其对土壤

最重要的影响是增强了抵抗风蚀和水蚀的能力;地面结皮由紧贴地面的多叶地衣组成,它们是真菌和藻类或蓝绿藻联结共生的^[1]。同样它们能够保护土表减轻侵蚀,这是因为真菌菌丝和地衣网状垫相联结在表土层形成垫状网增强了土壤的团聚稳定性^[19];微小的隐态结皮由微小的蓝绿菌、eukaryotic 微藻和丝状真菌组成。它们常出现在干扰过的样地,其主要集中在地下,有增强土壤团聚结构和改善养分状况的功能。

1.2 微生物结皮的演变

许多微生物演替的研究涉及结皮在人类活动等干扰后的恢复过程^[3]。Danin 和 Barbour^[20]对死海地区隐花植物和显花植物的演替进行了研究。作者讨论了因沟蚀和生物干扰及盐渍化引起的结皮部分成分死亡和发生的次生演替。Danin 等^[21]对 Sedom 山的一小干谷河道由谷底至谷顶的 5 层不同发育时期的冲积阶地的微生物结皮做了研究,研究表明,随着演替的进行,不仅结皮中增加了有机体,生物量和多聚糖,也增加了生物方解石。微生物的演替导致了微地形的复杂性,更好地促进了土壤的溶解水分状况,增进了更多有机体的生长和生物量生产。随着演替的进行,由于大量的方解石在结皮表面的沉积作用,结皮的稳定性得到提高。在我国的流沙治理中,利用麦草方格和栽植旱生植物的技术,流动沙丘被固定后,其表面微生物结皮的演变包括 3 个阶段,首先是风积物沉积和降水过程中雨滴作用形成的结皮,然后进一步发展以苔藓为优势成分的结皮,最后形成藻类、苔藓和叶苔等为主的微生物结皮。在这一过程中结皮及表土层的厚度和养分的增加,为沙面土壤进一步发育创造了条件^[22]。Eldridge 等人^[6]曾提出微生物结皮在受干扰(如火烧或过度放牧)后演变的假说。原始景观受到干扰后,非维管束植物是最初的侵入和定居者,根据土壤类型,雨滴作用和侵蚀过程导致雨滴作用结皮的形成,阻碍入渗和干涉种子的入侵^[23]。这种结皮后被微生物参与形成微生物结皮^[24]。结皮在藻类菌丝层的作用下经硅和碳酸盐的束缚变得更稳定。藻类所增加的养分为一些先锋短命维管植物提供了足够的营养要求^[25]。藻类植物的盖度达到高峰后随维管植物盖度的增大而降低,短命植物被 2 年生植物所代替,最终被多年生植物取代^[6],一旦土表被多年生草本所固定,地衣类盖度就会增大。地衣常要求底土层较稳定,因此藻类丝状物所固定的土表是

它们发育的先驱。而地衣的生长显著地提高了固氮能力,微生物结皮最终的发展阶段是苔藓和叶苔形成固定表面,虽然一些地区苔藓是地衣的先驱。

2 微生物结皮在景观过程中的作用

微生物群落(microbiota)的存在多与经自然侵蚀的稀疏植被景观相关联。其通过对土壤水文和侵蚀过程的影响,促进了景观的稳定性^[6]。

2.1 对土壤水文过程的影响

来自澳大利亚的野外观测表明,微生物结皮一般厚度为1~2 mm,通常包括数层相关的雨水作用结皮(也称结构结皮^[26])和沉积物结皮^[4]。在我国腾格里沙漠沙坡头地区固定沙丘上微生物结皮与表土层的厚度可达3.5 cm^[22]。Moss^[23]描述了雨水作用结皮是土壤表面厚约3~5 mm已被物理紧实,附有少量或无表层固体物的表土层。而沉积物结皮的产生则是从地表径流和积水物质沉淀的结果^[4];在我国沙区则是风蚀沉积物,凌裕泉等人^[27]的研究表明在沙坡头地区年均大气降尘($d < 0.063$ mm)的厚度为0.144 mm。有人认为,土壤表面微生物结皮的存在减少了降水的人渗而增加了径流和导致了

侵蚀的可能性^[28]。雨水作用结皮和沉积物结皮对入渗和渗透率的影响容易理解,但微生物结皮对降水的人渗作用至今存在着争议。许多研究认为有结皮的地区比无结皮区水分入渗明显增加^[29~33]。另外一些研究则证明微生物结皮使土壤的人渗明显地减少^[34~36]。争论的原因首先是对微生物结皮影响入渗本身解释就很困难,反映在入渗上的差异很可能是由于不同的结皮成分和湿度状况所造成。在微小的降水事件中,由于结皮的吸水和地形地貌异质性的增大使土壤表面持水力增大最后导致入渗量的增加^[6]。然而,在沙漠地区微生物结皮的存在对有限降水入渗的影响是十分明显的(表1),这是因为流动沙丘对降水的人渗率是100%,当降水量达到10 mm以上时,含水量为3%的沙丘地区24 h后剖面无干沙层出现,而在表层形成微生物结皮的固定沙丘剖面则仍有干沙层现象^[22]。此外,微生物结皮与土壤物理结构密切相关,它往往粘结细粒或完全关闭许多表土的导水孔隙。这一作用得到了电镜扫描的证实,因此,在降水过程中,微生物结皮减少水分渗透和限制水分是可能的。在土壤已经退化的情况下,微生物结皮在土壤表面的存在增加了水分进入土壤的有效性也是可能的^[37]。

表1 固定沙丘不同部位微生物结皮对降水入渗的影响^[38]

Tab. 1 The influence of microbiotic crusts on rainfall infiltration at the different position of fixed sand dunes

项 目	A	B	C	D	E	一次性降水量/mm	测定时间
降水入渗深度/(cm±S.E.)	22.25±2.8	20.23±0.44	19.32±1.84	20.97±0.31	26.38±1.79		
结皮+亚表土层厚/(cm±S.E.)	1.72±0.13	2.51±0.51	2.89±0.58	2.57±0.46	1.62±0.16	16.9	1999-05-17
对照(流动沙丘)	25.14±0.05	21.2±0.81	26.31±0.02	33.21±0.22	26.77±0.17		
降水入渗深度/(cm±S.E.)	36.15±0.25	26.27±1.22	23.20±1.95	33.65±2.26	35.45±0.85		
结皮+亚表土层厚/(cm±S.E.)	0.90±0.08	2.66±0.55	3.60±0.78	2.57±0.53	2.03±0.33	27.0	1999-06-16
对照(流动沙丘)	无干沙层	38.05±1.12	无干沙层	无干沙层	无干沙层		

A和E为沙丘顶部,B为背风坡,C为丘间低地,D为迎风坡

2.2 在水蚀和风蚀过程中的作用

许多关于微生物结皮在风蚀过程中作用的研究中都涉及到了它对水蚀的影响。大量的文献^[6,37,39,40~42]报道了微生物结皮具有减轻土壤水蚀的作用。在澳大利亚半干旱林地,微生物结皮有效地减少土壤表层沉积物的损失;Kinnell等^[41]指出微生物结皮能够有效地抵御雨后径流的冲刷;Eldridge和Greene^[6]证明了微生物结皮的覆盖度与水蚀量有极强的相关关系,即当微生物结皮覆盖度增大时,总的侵蚀量呈指数递减,且粗物质在沉积物中的比例增大。类似地,Alexander和Calvin^[43]在

西班牙Badlands的研究证明地衣覆盖的样地要比裸露样地被侵蚀的沉积物明显地减少。

微生物结皮对风蚀作用影响的研究主要在国外完成。Williams等人^[44]在美国半干旱草地的研究表明,当未受干扰的微生物结皮存在时,风蚀需要更高的初始摩擦速度。West^[3]讨论了人类、家禽和交通工具对结皮踩踏破坏结构后,如何使被结皮所固定的土壤细粒因风蚀而损失。Leys^[45]的风洞实验证明,结皮成分大比例的有机物质含量有效地降低了沙丘表面的风蚀。结皮的存在增加了土表的粗糙度,本身能够因降低近地表的风速而减少风蚀。风洞实验还表明,一些很易破碎的结皮在风速48 km

• h⁻¹的情况下仍能减轻风蚀,未受干扰的结皮与无结皮的地表相比,其减少风蚀总量是后者的 5 倍^[46]。

3 微生物结皮在土壤物理化学过程中的作用

一些研究已经证明土壤微生物能够增强土壤团聚的稳定性。例如 Bailey 等人^[19]利用藻类接种改良土壤颗粒团聚结构。Tisdall 和 Oades^[47]证明菌类的菌丝体能够粘结 <0.25 mm 的颗粒使之团聚成为稳定的 >0.25 mm 的微团聚体。微生物结皮的存在使这些团聚比一般土壤中的团聚更为稳定^[42,48]。电镜扫描研究也解释了微生物结皮中菌丝体在土壤颗粒团聚中的作用^[49]。对此, Greene 等人^[42]提供了微形态学证据,土壤微生物把非结晶粘胶状的有机物密切地粘结在一起,而有机物又将矿物细粒进一步粘结,形成球状表面团聚。这样既借助于菌丝体将土壤细粒紧紧地粘结,又通过微生物分泌物的粘结,促使土表的稳定性增强而避免风蚀和水蚀。Bond 和 Harris^[50]和 Rogers^[38]的工作也证明了菌丝体的生长特性和所分泌黏液及叶鞘能粘固土表,防止侵蚀。除了增加土壤团聚的功能以外,微生物结皮中的菌类成分可能包含对土壤中水分的排斥 (repellency) 作用。Bond 和 Harris^[50]发现局部具有水分排斥作用的土壤中存在大量菌类增殖的证据,由此得出微生物的代谢产物对土壤水分有排斥性的结论。Savage 等人^[51]也曾预言菌体的增殖是产生这一现象的关键因素。

Shubert 和 Starks^[52], Starks 和 Shubert^[53,54]的研究表明,化学元素 Cd, Li, Cu, Mo 和 Sr 与土

壤中藻类的丰富度呈负相关关系,而 Zn 和 Pb 存在正相关关系。Mr 和 Si 元素在一些地区与藻类的丰富度呈负相关,在另外一些地区则有正相关关系。在不同的研究中, Shubert 和 Starks^[55]发现 Na 的含量是结皮中藻类最为重要的非有机物调节者,当 Na 的含量较低时,藻类的多样性高。他们还证明高含量的 Na 有利于蓝细菌的发育,例如 *Nostoc muscorum* 对 Na 的需求量为 3 mg · kg⁻¹。尿素和磷酸盐对蓝藻有病害作用^[56]。如果是这样的话,人类和动物的排泄物不能做为肥料用于非农业地,但这需进一步的实验研究^[57]。磷以 KH₂PO₄ 的形式存在时有限制藻类生长对养分需求的作用^[58]。非有机磷的使用有可能是促进微生物结皮的一个途径。King 和 Ward^[58]还用实验肯定了 pH 值的增加有利于蓝绿菌的发育。张继贤等人^[59]研究表明,在沙丘固定后表面结皮的形成过程中, pH 值有所增大,盐分含量由 0.047% 增至 0.063%, 结皮中 SiO₂ 随结皮的发育逐渐减少, Fe₂O₃ 则相应增大, 常量元素和微量元素及 CaCO₃ 均有增大的趋势,且 CaCO₃ 的累计是显著的^[27]。

4 微生物结皮在土壤生态过程中的作用

4.1 微生物结皮与养分循环

关于微生物结皮与养分,蓝绿菌在干旱半干旱地区的固氮作用得到了较早的承认^[60]。其固氮率为 2~41 kg · hm⁻² · a⁻¹^[3]。在广袤的干旱地区小量降雨是常见的降水形式,而微生物结皮能够高效地利用这些小阵雨。Charley 和 Cowling^[61]的观测

表 2 不同时期固定沙丘不同地形部位的结皮与土层发育状况和土壤养分的关系^[38]

Tab. 2 Microbiotic crust and soil nutrient contents at different dune position with different ages

沙丘固定的时间	沙丘部位	结皮与土层的厚度 /cm	有机质含量 / (g · kg ⁻¹)	全养 / (g · kg ⁻¹)			有效养分 / (g · kg ⁻¹)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	水解 N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1956 年	A	2.06	11.871	0.521	0.775	25.021	3.245	1.470	17.500
	B	2.88	12.633	0.420	0.750	23.753	2.871	1.060	17.500
	C	2.11	14.335	0.632	0.845	22.502	4.421	1.956	17.000
	D	2.91	12.931	0.451	0.865	25.021	3.335	1.253	20.150
	E	3.34	11.332	0.415	0.705	22.502	2.310	0.811	16.000
1981 年	A	0.57	6.434	0.360	0.535	22.511	2.810	0.592	12.000
	B	1.71	6.465	0.334	0.535	22.534	2.135	1.255	12.000
	C	1.93	9.485	0.485	0.584	23.753	3.245	0.604	17.000
	D	1.66	9.595	0.475	0.671	23.752	3.600	0.851	23.500
	E	0.47	4.595	0.275	0.575	22.510	1.785	0.532	16.000
流动沙丘	C	0	0.860	0.060	0.290	18.670	0.706	0.705	11.50

A 和 E 为沙丘顶部, B 为背风坡, C 为丘间低地, D 为迎风坡

表明,小量的降水能使结皮中的微生物活跃起来,随之少量氮被固定而进入土壤养分库。Mayland 和 McIntosh^[62]在实验室的研究也证明了氮经过藻类结皮的固定后再传送给高等植物。在我国沙漠地区微生物结皮对风沙土养分条件的改善是显著的(表2),由表2可见,随着固沙时间的增加(结皮发育的时间也长),养分在沙土中(0~20 cm)的积累显著地增多。而 Kleiner 和 Harper^[63]曾认为,微生物结皮对土壤养分循环的更重要的贡献在于防止了大面积土壤侵蚀而保护了养分。除了固氮之外,微生物结皮对土壤碳的积累有着潜在的贡献。Beymer 和 Klopatek^[64]证实结皮中的蓝藻、其它陆生藻、地衣和苔藓利用光合作用固定有机碳促使其直接进入土壤生态系统。因此,对牧场提出成熟的碳量平衡的对策是非常有意义的^[65]。

4.2 结皮与无脊椎动物的关系

由于与结皮相关而产生的大量的养分和维管束植物生物量的积累,为无脊椎动物的发生与生存创造了条件。这方面的研究国内相对薄弱,沙坡头人工固沙植被区结皮的形成为沙蜥(*Phrynocephalus przewalskii*)创造了食物条件和优越的生境,使其种群数量远远大于流沙区。国外一些研究报道了蚂蚁吃食苔藓的蒴果^[66]。沙漠中 *Hemilepistrus reaumuri* 依靠微生物结皮获得能量与蛋白质^[67]。另外,一些种利用结皮做为其生存环境^[3]。

4.3 微生物结皮与维管束植物种子的萌发

虽然一些研究表明微生物结皮增加了维管束植物种子繁殖及生存能力^[68],但离作结论尚远^[6]。可

以直观地认为,结皮增加了土表面的粗糙度,提供了一个相对有利的生境而增强了维管束植物繁殖存活力^[69]。结皮所增加的微地形差异性也可以导致在同质和平坦景观中水分与养分的分配格局^[24]。在一些蓝藻占优势的地区,结皮上呈现了一层光滑的藻类层外貌,其增加了表面粗糙和微地貌的变异性,保护了在其上生长的植物免受风沙掩埋。Mucher 等^[39]和 Eldridge 等人^[70]的研究证明,植物的繁育生长与微生物结皮的相关性是不一致的。李新荣等人^[22]的研究认为:在沙坡头结皮发育较早的固沙区(1956 固定的沙丘),结皮的形成使沙面形成了一层紧实的“保护膜”(特别是在丘间低地),再加沙漠地区频繁而强大的风力作用(年均风速 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),植物的种子很难在其上保存。种子雨多汇集在沙面的粗糙度大、有枯死的植株和半灌木油蒿(*Artemisia ordosica*)等植物分布的根际范围,由于粗糙度大,风速相对较小,植物的种子容易得到保存而不被风吹走,另一方面结皮及下层土壤发育层中微植物根系密集分布,结皮表面被有密集绒状的藻类、苔藓等形成紧实的板状结构,即使一年生植物种子因遇有限的降水得到萌发,但其根系很难在结皮表层侵入而很快因失水而枯死。样地调查表明,一年生草本植物在样地中的分布主要集中在结皮受损(因人和动物的活动而破裂)的局部和油蒿等灌丛周围,在沙丘背风坡较松软的局部草本植物得到了较好的发育。表3的调查结果表明,微生物结皮和亚表层土壤的增厚对一年生草本植物的定居繁衍设置了障碍,适当的人为干扰有利于草本植物的生长。随着结皮和表土层在固定沙丘上的进一步发展,地上植物群落种的组成与多样性趋于饱和(图2)^[38]。

表3 不同结皮条件下雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)的密度/高生长^[38]

Tab. 3 Density/height of *Bassia dasyphylla* under different crust conditions

结皮状况	沙丘顶部	背风坡	丘间低地	迎风坡
结皮完整	177.6/6.3	200.0/5.9	20.3/5.4	224.7/5.3
受破坏	361.3/6.1	404.7/6.3	120.0/4.6	398.4/5.5
人为全部破坏	343.6/11.3	316.6/11.5	298.9/16.7	355.9/14.7

* 密度单位:个体数·m⁻²,高生长单位:cm; 1999-06-16 调查

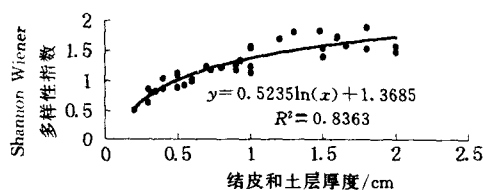


图2 一年生植物多样性与结皮及土层厚度的相关性

Fig. 2 The relationship between annual diversity and depth of microbiotic crust and topsoil

5 微生物结皮在荒漠化防治中的意义

荒漠化是当今国际社会极为关注的全球性的环境问题,我国是受荒漠化危害最为严重的国家之一。全国退化草场占可利用草场面积的1/4;水土流失面积占国土面积的1/6;国土沙化面积达1.26亿hm²;盐化面积达0.27亿hm²。在受到荒漠化危害的近4亿人口中,他们多数集中在我国的北方干旱

半干旱区。由于干旱、风沙、水蚀、盐碱化、草场退化、植被锐减、生物生产量的减低和可利用土地资源的丧失以及因不合理人为经济活动所造成的巨大的环境压力,致使荒漠化不仅成为这些地区贫困和生态恶化的重要因素,而且也事关人类未来的生存。因此,在国家实施“西部大开发”的战略中生态环境的建设成了重要的环节。微生物结皮在这一地区的发育及其演变可作为荒漠化发生、发展和逆转的景观特征之一和指示生物。由于在干旱半干旱地区景观过程、土壤水文过程、土壤物理化学与生物地球化学循环等生态过程的作用和地位,微生物结皮在我国北方荒漠化地区具有广泛的应用前景。例如,在沙区铁路公路等交通干线沙害治理体系中进行人工接种实验,促进微生物结皮在沙面的发育,稳定沙物质,抵御风蚀和沙暴,加强防护体系的整体稳定性;开发和利用藻类结皮,结皮的发育为一些具有很高经济价值的种(如发菜 *Nostoc commune*)的繁育也创造了条件。因此,如何合理利用这一资源对荒漠化地区生态环境的恢复与重建具有重要的意义。

参考文献 (References):

- [1] Metting B. Biological surface features of semiarid lands and deserts[A]. Skujins J. Semiarid Lands and Deserts: Soil Resource and Reclamation[C]. New York: Marcel Dekker, 1991. 257-293.
- [2] Eckert R E, Wood Jr, Blackburn M K, *et al.* Effects of surface soil morphology on improvement and management of some semiarid rangelands[A]. Hyder D N. Proc. Frist Int. Rangel. Congr. Society for Range Management[C]. Denver, Colorado, 1978. 299-302.
- [3] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystem of arid and semi-arid regions[J]. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20:179-223.
- [4] Chartres C J. Soil crusting in Australia[A]. Sumner M E, Stewart B A. Soil Crusting: Chemical and Physical Processes. Boca Raton, Florida; Lewis Publishers 1992, 339-365.
- [5] Evenari M. The Desert environment[A]. Evenari M, Noy-Meir I, Goodall D W. Hot Deserts and Arid Shrublands, Vol. 12A: Ecosystem of the World[C]. Amsterdam: Elsevier, 1985. 31-101.]
- [6] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts; a view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32:389-415.
- [7] Seppelt R D. Bryophytes of the vestfold hills[A]. Pickard J. Antarctic Oasis[C]. Sydney: Academic Press, 1986. 221-246.
- [8] Zhang Xianwu, Xu Guanghui. Study on soil microorganisms in Tengger Desert Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, 10(3):227-234. [张宪武, 许光辉. 腾格里沙漠地区土壤微生物的研究[J]. 土壤学报, 1962, 10(3):227-234.]
- [9] Zhang Xianwu, Zhou Chonglian. Study on soil microorganisms in desert region along Baotou - Lanzhou railway Line [A]. *Shifting Sand Control*[C], No. 5. Beijing: Science Press, 1963. [张宪武, 周崇莲. 包兰铁路沿线沙漠地区土壤微生物的研究[A]. 流沙治理研究[C] No. 5. 北京: 科学出版社, 1963.]
- [10] Chen Zhuchun, Zhang Jixian, Li Dingshu, *et al.* The microbiological characteristics in various types of sand dunes in southeastern Tengger Desert[J]. *J. Desert Research*, 1983, 3(1): 20-26. [陈祝春, 张继贤, 李定淑, 等. 腾格里沙漠东南缘不同类型沙丘的微生物学特征[J]. 中国沙漠, 1983, 3(1): 20-26.]
- [11] Chen Zhuchun, Li Dingshu. Microflora variation of afforested sand dunes soil in Naiman Banner, Horqin sandy land[J]. *J. Desert Research*, 1992, 12(3): 18-21. [陈祝春, 李定淑. 科尔沁沙地奈曼旗固沙林地土壤微生物区系动态[J]. 中国沙漠, 1992, 12(3): 18-21.]
- [12] Zhu Zhicheng, Guo Ailian, Yue Ming. Advancing succession and reversing succession of *Sobila vulgaris* communities on the Loess plateau in north Shaaxi province[J]. *J. Northwest University (natural science)*, 1996, 26(4): 325-329. [朱志诚, 郭爱莲, 岳明. 陕北黄土高原臭柏群落进展演替和逆行演替[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1996, 26(4): 325-329.]
- [13] Richardson D H S. The Biology of Mosses[M]. New York: John Wiley, 1981.
- [14] Howarth L. The ecology of perennial moss species in chenopod shrublands of Middleback station[D]. South Australia. B. sc. (hons) Thesis. Univ. South Australia, 1983.
- [15] Anderson R W, Calvin A. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands[A]. Thornes J B. Vegetation and Erosion[C]. London: John Wiley, 1983. 385-398.
- [16] Downing A J, Sekirk P M. Bryophytes on the calcareous soils of Mungo National Park - an arid of southern central Australia[J]. *Great Basin Naturalist*, 1993, 53: 13-23.
- [17] Rogers R W. Disribution of lichen *Chondropsis semiviridis* in relation to its heat and drought resistance[J]. *New Phytol.*, 1971, 70: 1069-1077.
- [18] Rogers R W. Blue-green algae in southern Australian rangeland soils[J]. *J. Australian Range.*, 1989, 11: 67-73.
- [19] Bailey D, Mazurak P A, Rosowski J R. Aggregation of soil particles by algae[J]. *J. Phycol.*, 1973, 9: 99-101.
- [20] Danin A, Barbour M G. Microsuccession of cryptogams and phanerogams in the Dead Sea area, Israel[J]. *Flora*, 1982, 172:173-179.
- [21] Danin A, Inka Dor, Sandler A, *et al.* Desert crust morphology and its relations to microbiotic succession at Mt. Sedom, Israel[J]. *J. Arid Environments*, 1998, 38: 161-174.
- [22] Li Xinrong, Zhang Jingguang, Liu Lichao, *et al.* Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China[J]. *Acta Phytocologica*, 2000, 24(3): 257-261. [李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 257-261.]
- [23] Moss A J. Rain-impact soil crust. I. Formation on a granite-derived soil[J]. *J. Soil Res.*, 1991, 29, 271-289.
- [24] Scott G A M. Desert bryophytes[A]. Smith A J E. Bry-

- phytes Ecology[C]. London: Chapman and Hall, 1982. 105-122.
- [25] Isichei A O. The role of algae and cyanobacteria in arid lands-A review[J]. *Arid Soil Res. Rehab.*, 1990, (4): 1-17.
- [26] Shainberg I. The effect of exchangeable sodium and electrolyte concentration on crust formation[J]. *Adv. Soil Sci.*, 1985, (1): 101-122.
- [27] Ling Yuquan, Qu Jianjun, Hu Ming. Formation of sand surface crust and micro-environmental changes[J]. *J. Applied Ecology*, 1993, 4(4): 393-398. [凌裕泉, 屈建军, 胡玫. 沙面结皮形成与微环境变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 393-398.]
- [28] Romkens M J M, Prasad S N, While F D. Surface sealing and infiltration[A]. Anderson M G, Burt I P. Process Studies in Hillslope Hydrology[C]. New York: John Wiley, 1990. 127-172.
- [29] Fletcher J E, Martin W P. Some effects of algae and molds in the rain-crust of desert soils[J]. *Ecology*, 1948, 29: 95-100.
- [30] Gifford G F. Infiltration rate and sediment production on a plowed big sagebrush site[J]. *J. Range Manage.*, 1972, 25: 53-55.
- [31] Blackburn W H. Factors influencing infiltration rate and sediment production of semiarid rangelands in Nevada[J]. *Water Resour. Res.*, 1975, 11: 929-937.
- [32] Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microphytic crust cover: further evidence from a wooded semiarid Australian rangeland[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11: 113-126.
- [33] Williams J D, Dobrowolski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999, 13: 145-154.
- [34] Loope W L, Gifford G F. Influence of a soil microfloral crust on selected properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 1972, 27: 164-167.
- [35] Danin A. Plant species diversity and plant succession in a sandy area in the northern Negev[J]. *Flora*, 1978, 167: 409-422.
- [36] Brotherson J D, Rushforth S R. Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships of a soil in Navajo National Monument, Arizona[J]. *Great Basin Naturalist*, 1983, 43: 73-79.
- [37] Eldridge D J. Cryptogams, vascular plants, and soil hydrological relations: some preliminary results from the semiarid woodlands of eastern Australia[J]. *Great Basin Naturalist*, 1993, 53: 48-58.
- [38] Li Xinrong, Zhang Jingguang, Wang Xiping, et al. Soil microbiotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region [J]. *J. Desert Research*, 1999, 19 (Supp.): 165-169. [李新荣, 张景光, 王新平, 等. 干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(Supp.): 165-169.]
- [39] Mucher H J, Chartres C J, Greene R S B. Micromorphology and significance of the surface crusts of soils in rangelands near Cobar, Australia[J]. *Geoderma*, 1988, 42: 227-244.
- [40] Chartres C J, Mucher H J. The response of burnt and unburnt rangeland soil surfaces to simulated raindrop impact and water erosion[J]. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 1989, 14: 407-417.
- [41] Kinnell P I A, Chartres C J, Wastson C L. The effect of fire on the soil in a degraded semiarid woodland. II. Susceptibility of the soil to erosion by shallow rain-impact flow[J]. *Australian J. Soil Res.*, 1990, 28: 779-794.
- [42] Greene R S B, Chartres C J. The effect of fire on the soil of the degraded semiarid woodland. I. Cryptogam cover and physical micromorphological properties [J]. *Australian J. Soil Res.*, 1990: 755-777.
- [43] Alexander R W, Calvin A. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands[A]. Thornes J B. Vegetation and Erosion[C]. London: John Wiley, 1990. 385-398.
- [44] Williams J D, Dobrowolski J P, Gillette D A, et al. The role of microphytic crust on wind induced erosion[A]. Proc. 46th Annual Meeting Soc. Range Management[C]. Albuquerque, New Mexico, U. S. A., 1993.
- [45] Leys J F. Cover levels to control soil and nutrient loss from wind erosion on sandplain country in central N. S. W. [A]. Proc. 7th Biennial Conference of the Aust. Rangel. Soc. [C]. Cobar, Oct. 1992. 84-91.
- [46] Leys J F. Soil crusts, their effect on wind erosion[Z]. Soil Conservation service of N. S. W. Research Note 1/90. 1990.
- [47] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *J. Soil Sci.*, 1982, 33: 146-163.
- [48] Greene R S B, Tonway D J. The significance of surface physical and chemical properties in determining soil surface condition of red-earths in rangelands[J]. *Aust. J. Soil Res.*, 1989, 27: 213-225.
- [49] Van der Watt H V H, Chartres A S. Effect of surface treatment on soil crusting and formation[J]. *Soil Technology*, 1990, 3: 241-251.
- [50] Bond R D, Harris J R. The influence of microflora on the physical properties of soils. I. Effects associated with filamentous algae and fungi[J]. *Aust. J. Soil Res.*, 1964, 2: 111-122.
- [51] Savage S M, Martin J P, Letey J. Contribution of some soil fungi to natural and heat-induced water-repellency in sand [J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1969, 33: 405-409.
- [52] Shubert L E, Starks T L. Algal succession on orphaned coal mine spoils[A]. Wali K M. Ecology and Coal Resource Development[C]. New York: Pergamon Press, 1979. 661-667.
- [53] Starks T L, Shubert L E. Algal colonization on a reclaimed surface-mined area in western North Dakota[A]. Wali M K. Ecology and Coal Resource Development[C]. New York: Pergamon Press, 1979. 652-660.
- [54] Starks T L Shubert. Colonization and succession of algae and soil-algal interactions associated with disturbed areas[J]. *J. Phycology*, 1982, 18: 99-107.
- [55] Shubert L E, Starks T L. Soil-algal relationships from surface mined soils[J]. *British phycological Journal*, 1980, 15: 417-428.
- [56] Balezina L E. Effect of concentrated mineral fertilizers on the growth of soil algae[J]. *Pochvovedeniye*, 1974, 9: 94-96.
- [57] Campbell S E, Seeler J S, Glolubic S. Desert crust formation

- and soil stabilization[J]. *Arid Soil Res. Rehab.*, 1989, 3: 317-328.
- [58] King J M, Ward C H. Distribution of edaphic algae as related to land usage[J]. *Phycologia*, 1977, 16: 23-30.
- [59] Zhang Jixian, Di Xingmin, Wang Shuxiang. Characteristics of regional eco-environment change during the processes of protective system coconstruction in Shapotou area[A]. Annual Report of Shapotou Desert Research and Experiment Station(1991-1992)[C]. Lanzhou: Guansu Science and Technology Press, 1993. 128-138 [张继贤, 邸醒民, 王淑湘. 沙坡头防护体系建立过程中区域生态环境变化特点[A]. 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年报(1991-1992)[C]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 128-138.]
- [60] Rogers R W, Lange R T, Nicholas D J D. Nitrogen fixation by lichens of arid zone crusts[J]. *Nature*, 1966, 209: 96-97.
- [61] Charley J L, Cowling S W. Changes in soil nutrient status resulting from overgrazing and their consequences in plant communities of semi-arid areas[J]. *Proc. Ecol. Soc. Aust.*, 1968, 3: 28-38.
- [62] Mayland H F, McIntosh T H. Availability of biologically fixed atmospheric nitrogen 15 to higher plants[J]. *Nature*, 1966, 209: 421-422.
- [63] Kleiner E F, Harper K T. Soil properties in relation to cryptogamic ground cover in Canyonlands National Park[J]. *J. Range Manage.*, 1977, 30: 203-205.
- [64] Beymer R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands[J]. *Arid Soil Res. Rehab.*, 1991, 5: 187-198.
- [65] Mckeon G M, Howden S M, Stafford Smith M D. The management of extensive agriculture: greenhouse gas emissions and climate change[A]. Proc. IPCC/AFOS Workshop: Assessing Technologies and Management Systems for Agriculture and Forestry in Relation to Global Climate Change[C]. Canberra, 1992. 42-47.
- [66] Loria M, Herrnstadt J. Moss capsules as food of the harvester ant[J]. *Messor. Bryologist*, 1980, 83: 524-525.
- [67] Steinberger Y. Energy and protein budgets of the desert isopod *Hemilepistus reaumuri*[J]. *Acta Oecologia*, 1989, 10: 117-134.
- [68] Harper K T, St Clair L L. Cryptogamic soil crusts on arid and semiarid rangelands in Utah[A]. Effects on seedling establishment and soil stability[C]. Final Rept Bureau Land Management, Utah State Office, Salt Lake City, 1985.
- [69] Harper J L. Population Biology of Plants[M]. New York: Academic Press, 1977.
- [70] Eldridge D J, Westoby M, Holbrook K M. Soil surface characteristics, microtopography and proximity to mature shrubs: effects on survival of several cohorts of *Atriplex vesicaria* seedlings[J]. *J. Ecol.*, 1992, 78: 357-364.

Advances in Microbiotic Soil Crust Research and Its Ecological Significance in Arid and Semiarid Regions

LI Xin-rong¹, JIA Yu-kui², LONG Li-qun¹, WANG Xin-ping¹, ZHANG Jing-guang¹

(1. Shapotou Desert Experiment and Research Station, Cold & Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Experimental Centre of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: Soil microbiotic crust is developed broadly and has an ecological significance in arid and semiarid regions. This paper reviewed the advances of domestic and overseas studies, which on characteristics of the formation and development of microbiotic crust, its effects on microhabitat, including physical and chemical properties of soil, endurance to wind and water erosion, the distribution of precipitation in spatial and time, nutrient and chemical elements variance in soil process and geo-bio-chemical cycling process, and influence on vegetation dynamics. In addition, the several contradictory research conclusions were syntheticaly analyzed. The role and function of microbiotic crust in ecological restoration of arid and semiarid regions of China were discussed.

Key words: arid and semiarid regions; soil microbiotic crust; ecological process; soil process