

生物结皮影响下的土壤有机质分异特征

张元明, 杨维康, 王雪芹, 张道远

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 对新疆古尔班通古特沙漠生物结皮影响下的土壤有机质分异特征进行了定量研究。结果表明, 该沙漠典型沙垄不同部位具有不同的土壤有机质特征, 且土壤有机质含量具有明显的分层特征。无论是结皮覆盖区还是非覆盖区, 土壤有机质的积累均以表层 0~5cm 土层为主, 由表及里呈递减趋势。这种地表有机质分布的规律在该沙漠地表普遍存在。虽然如此, 生物结皮却强烈影响着地表 0~5cm 土层有机质的含量的积累, 它的存在使得该层有机质含量极显著地高于无结皮覆盖区 0~5cm 土层的有机质含量(t 检验, $p < 0.01$), 表明生物结皮能显著增加地表 0~5cm 土层的有机质含量; 而无论结皮覆盖区还是非结皮覆盖区, 两者 5~10cm 土层之间和 10~30cm 土层之间的有机质含量无显著差异(t 检验, $p > 0.05$), 说明生物结皮对土壤有机质含量的影响范围仅限于表层 0~5cm, 对更深层次土壤的有机质含量则无显著影响。

关键词: 生物结皮; 土壤有机质; 积累; 古尔班通古特沙漠

文章编号: 1000-0933(2005)12-3420-06 中图分类号: Q 948 文献标识码: A

Influence of cryptogamic soil crusts on accumulation of soil organic matter in Gurbantunggut Desert, northern Xinjiang, China

ZHANG Yuan-Ming, YANG Wei-Kang, WANG Xue-Qin, ZHANG Dao-Yuan (*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3420~3425

Abstract Biological soil crust, formed by different combinations of mosses, lichens, liverworts, algae, fungi, cyanobacteria and bacteria, is a common and widespread phenomenon in desert areas all over the world thanks to its extraordinary ability to survive desiccation and extreme temperatures, high pH and salinity. Despite its unassuming appearance, biological soil crusts play a significant role in desert ecosystems, including involvement in the process of formation, stability and fertility of soil, preventing soil erosion by water or wind, increasing the possibility of vascular plant colonization, and being responsible for the stabilization of sand dunes. The present paper focuses on distribution of soil organic matter (SOM) in the Gurbantunggut desert influenced by biological soil crust. We found that the SOM content gradually decreased from inter-dunes to the top of sand dunes at each depth of soil layers in the Gurbantunggut Desert. The SOM content in inter-dune valley is higher than that on the slopes and top of sand dunes. At each location on sand dunes, the SOM was mainly distributed in the surface 0~5cm soil layer with or without crust cover. This is the general distribution pattern of SOM in this desert. However, further ANOVA analysis shows that the occurrence of biological crust in the Gurbantunggut Desert could significantly enhance the accumulation of SOM in the surface 0~5cm soil layer compared with the areas devoid of crust cover ($p < 0.01$). There are no significant difference for SOM content between 5~10cm and 10~30cm soil layers ($p > 0.05$). That means the biological soil crust can only influence the accumulation of SOM in the surface 0~5cm soil layer, and seldom influence the deeper soil layers.

Biological soil crust can be an important source of fixed carbon in sparsely vegetated areas common throughout arid lands. Although the influence of biological crust on SOM content was only displayed in the surface 0~5cm soil layer, the crust is likely to positively serve as an important nutrient input to the whole desert ecosystem due to its large coverage in the

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90202019); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043509)

收稿日期: 2004-06-30; **修订日期:** 2004-12-10

作者简介: 张元明(1972~), 男, 新疆人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区植生态学研究

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 90202019); National Key Development Project for Basic Research(No. G1999043509)

Received date: 2004-06-30; **Accepted date:** 2004-12-10

Biography: ZHANG Yuan-Ming, Ph. D., Professor, mainly engaged in plant ecology in arid areas

Gurbantunggut Desert. Particularly, the intensive accumulation of SOM in the surface 0~5 cm layer would be beneficial to growth of ephemerals and ephemeroids, which were well-developed in the Gurbantunggut Desert, thriving from early April to September. While vascular plants contribute organic matter to soils directly beneath them, large interspaces between plants receive little plant material input. Where biological soil crusts are present, carbon and nitrogen contributed by these organisms help keep plant interspaces fertile, providing energy sources from soil microbial populations. The surface intensive accumulation of SOM also enhance seed germination and seedling establishment.

Key words: biological soil crust; organic matter; concentration; Gurbantunggut Desert

荒漠地表生物结皮是由土壤微生物、藻类、地衣和苔藓植物等孢子植物类群与土壤形成的有机复合体, 它的形成使土壤表面在物理、化学和生物学特性上均明显不同于松散沙土, 具有较强的抗风蚀、水蚀功能, 也是干旱荒漠地区植被演替的重要基础^[1, 2]。

研究表明, 由于生物结皮具有独特的生理生态过程, 使其可广泛存在于各种荒漠生境条件下^[3], 包括极端干旱、高温(最高温度可达 70 ℃)和高 pH 值的环境^[4, 5]。生物结皮的分布已在世界各大沙漠地区得到确认, 在某些地区其盖度甚至可占到地表的 70%^[3]。生物结皮在荒漠生态系统中的重要性表现为: (1) 生物结皮中细菌、真菌、地衣和苔藓植物的地下菌丝和假根能够黏结沙粒^[6], 它们的存在能够有效地减小风和水对荒漠地表的侵蚀, 对降低防沙固沙的投入成本和改善生态环境起着积极的作用^[4~7]; (2) 生物结皮中的许多种类能够进行光合作用, 某些种类还可以固定大气中的氮素, 对土壤理化性质的改变和增加土壤有机质含量起着重要作用, 从而为维管植物的定居创造有利条件, 最终起到固定沙丘的作用^[8]; (3) 生物结皮的出现和发展指示了流动沙漠向固定和半固定沙漠转化的重要阶段, 可被用作生态环境健康评价的指标, 其时空变化可揭示干旱荒漠地区生态环境的演变趋势和对全球变化的响应规律^[9]。尽管生物结皮在荒漠生态系统中起着重要作用, 但长期以来却很少被作为主要生物因素来加以关注^[10, 11], 直到 20 世纪 80 年代以后, 伴随着沙漠化威胁的日益加重, 生物结皮的重要作用愈发突出, 才逐渐引起人们的重视^[12~27], 生物结皮资源的保护被列为荒漠生态系统管理的最优先等级^[9, 12, 27]。

国内外学者从孢子植物生理生态特性的角度入手, 研究证实生物结皮的存在能够影响土壤理化性质, 增加土壤有机质的含量^[8, 14]。但是这种影响发生在多大的范围尚未见定量研究的报道, 尤其是对于结皮覆盖区与无结皮覆盖区有机质含量差异的对比研究仍十分缺乏。本文以新疆古尔班通古特沙漠为研究区域, 试图阐明以下两个问题: (1) 该沙漠生物结皮的存在能否影响土壤有机质含量? (2) 若能够影响, 其影响强度和深度有多大? 通过对上述问题的剖析, 定量化描述古尔班通古特沙漠生物结皮影响下的土壤有机质分异规律, 为理解生物结皮在荒漠生态系统中的重要作用提供依据。

1 研究区概况及研究方法

古尔班通古特沙漠(以下称古沙漠)位于新疆北部准噶尔盆地腹心, 范围为北纬 44°11′至 46°20′, 东经 84°31′至 90°00′, 面积 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国最大的固定和半固定沙漠, 其周围还有零星分布有许多面积大小不等的沙漠或沙地。其南缘区与源出天山的冲积、洪积扇缘相接, 构成了天山北坡至盆地自然垂直带的基带。该沙漠年平均降水量普遍不超过 150 mm, 沙漠腹地仅有 70~100 mm, 主要集中于春季。年平均蒸发量在 2000 mm 以上。年均温 6~10 ℃, 极端高温为 40 ℃以上, ≥ 10 ℃的活动年积温可达 3000~3500 ℃, 空气相对湿度平均 50%~60%, 5~8 月通常在 45% 以下。该沙漠由白梭梭、梭梭和其它沙生植物构成的小半乔木群落广泛发育, 同时由于降水的季节分配较为均匀, 冬春有一定的雨水, 使短命和类短命植物获得一定发育^[28]。除此以外, 该沙漠地表还发育有良好的生物结皮, 根据水分条件、生物种类和发育阶段的不同而呈现出黑色、黑褐色、白色和黄绿色等^[29]。

据野外观察, 该沙漠地表的生物结皮常年存在, 主要利用春季融雪、临时性降水和露水进行生长, 并在干旱缺雨季节进入休眠状态。本研究野外调查、采样的时间分别选择在 2002 年 10 月、2003 年 10 月降雪前进行, 此时沙漠中的种子植物多数枯萎凋落, 地表生物结皮裸露并处于生长期, 有利于观测与采样。本研究分别于 2002 年 10 月进行采样, 并于 2003 年 10 月进行重复采样, 研究数据采用两次分析结果的平均值。采样时, 选择古沙漠有生物结皮分布的典型沙垄, 共设置 14 个样点(图 2)。

每个样点内, 在丘间低地(地衣、苔藓结皮)、沙坡中部(迎风坡, 藻类结皮)和沙丘顶部(流动沙丘)等部位采集生物结皮和

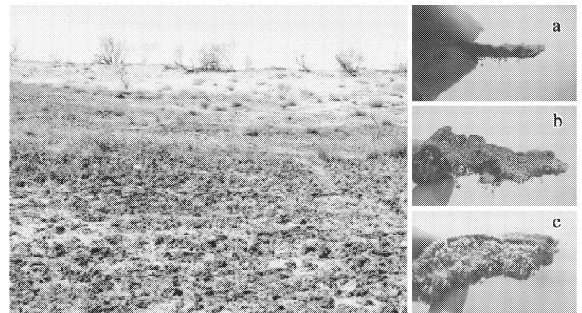


图 1 古尔班通古特沙漠景观(左)及不同类型的生物结皮

Fig 1 Interview of Gurbantunggut Desert(left) and different types of biological soil crust

(a) 藻结皮 Algae crust; (b) 地衣结皮 Lichen crust; (c) 苔藓结皮 Moss crust

土壤样品。在每个沙垄部位的结皮覆盖区域和沙丘顶部流动带(实验组)各随机采集 8 个剖面的土壤样品,同一部位、同一层次的 8 组土样进行混合,以减少采样点之间的系统误差。考虑到该沙漠生物结皮厚度一般在 0.2~5 cm 的范围,因此每个土壤剖面以 0~5 cm (结皮层)、5~10 cm (结皮下层)和 10~30 cm (结皮下层)为间距分割采样。同时,在丘间低地和沙坡中部选择无结皮覆盖区域作为对照组,其土壤剖面的设置、样品采集数以及取样间隔均与实验组相同。

为单纯研究生物结皮对土壤有机质的影响,取样时选择无种子植物分布的区域,以避免种子植物对实验结果的干扰。沙垄顶部基质较为均一,无结皮覆盖,故不设对照组。不同类型生物结皮的种类组成及主要土壤理化性质见表 1。

实验室分析前,先以土壤筛(Φ 2.5 mm)去除土壤样品中的生物结皮及种子植物枯枝落叶与根系,以排除由于生物有机体的存在对土壤有机质含量的干扰。然后采用高锰酸钾氧化法测定土壤样品的有机质含量。

采用方差分析(ANOVA)分析沙垄不同部位及不同土壤层次间有机质含量的差异程度;使用 t 检验(t -test)分析同一层次土壤在结皮区和对照组之间有机质含量的差异程度。所有统计分析均使用 SPSS (8.0) 统计分析软件完成。

表 1 不同类型生物结皮的组成及其主要土壤理化性质*

Table 1 The species composition and soil chemical properties in different biological soil crusts*					
结皮类型 Crust type	采集部位 Location	主要物种 Main species	pH 值 pH value	总盐(%) Total salt content	厚度(cm) Thickness
地衣苔藓结皮 Lichen-moss crust	丘间低地 Inter-dune	刺叶墙藓 <i>Tortula desertorum</i> 银叶真藓 <i>Bryum argenteum</i> 红鳞网衣 <i>P. sora decipiens</i> 坚韧胶衣 <i>Collema tenax</i> 荒漠黄梅 <i>Xanthoparmelia desertorum</i>	8.011 ± 0.243	0.0387 ± 0.007	3.89 ± 0.154
藻结皮 Algae crust	迎风坡中部 Windward slope	沼地微鞘藻 <i>Microcoleus paludosus</i> 具鞘微鞘藻 <i>Microcoleus vaginatus</i> 固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i> 马氏鞘丝藻 <i>Lyngbya maritensiana</i> 鞘丝异球藻 <i>Xenococcus lyngbye</i>	8.147 ± 0.166	0.0383 ± 0.004	0.19 ± 0.047
流沙 Drifting sand	沙垄顶部 Top of dune	—	7.877 ± 0.257	0.0304 ± 0.006	—

* Mean ± S.E.

2 实验结果

2.1 土壤有机质的一般分布特征

实验结果表明,无论是结皮区还是非结皮区,其表层 0~30 cm 土壤有机质含量均呈规律性变化,即丘间低地有机质含量普遍较高,沙坡中部含量低于丘间低地,沙垄顶部土壤有机质含量最低,其表层 0~5 cm 含量甚至低于其他部位 10~30 cm 土层的含量。表明沙垄不同部位具有不同的有机质含量特征(图 3)。

对实验组和对照组各土壤层次之间有机质含量的方差分析结果表明,在各个沙垄部位,无论实验组或对照组,其共同特征表现为:土壤有机质含量在不同土层(0~5 cm, 5~10 cm, 10~30 cm)之间存在显著差异(ANOVA, $p < 0.05$) (表 2),表明土壤表层有机质含量在 0~30 cm 范围具有较为明显的垂直分布特征。

为探讨 3 个土壤层次中究竟哪两个层次有机质含量差异显著,进一步应用 LSD 法(ANOVA)进行各层之间有机质含量的差异显著性检验。检验结果表明,无论生物结皮存在与否,沙垄各部位地表 0~5 cm 土层的有机质含量均显著高于 5~10 cm 和 10~30 cm 土层,而 5~10 cm 和 10~30 cm 土层之间无显著差异(ANOVA, LSD 法, $p > 0.05$),这说明:(1)该沙漠典型沙垄各部位地表有机质的积累或分布均以表层 0~5 cm 为主,且由表及里呈递减趋势(图 1);(2)这种地表有机质积累的规律在该沙漠地表普遍存在。

2.2 生物结皮的存在对土壤有机质积累强度的影响

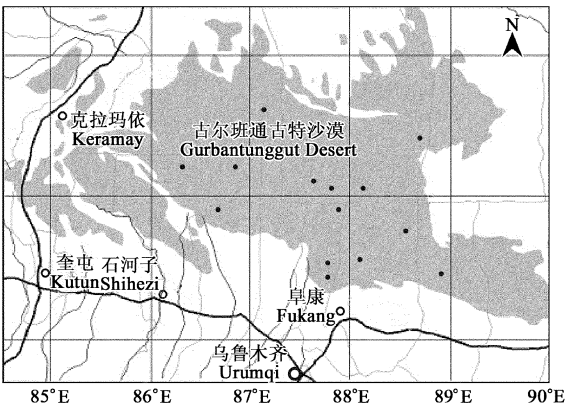


图 2 古尔班通古特沙漠样点布设

Fig. 2 Sampling sites distributed in Gurbantunggut Desert

生物结皮的存在是否影响到有机质积累强度, 作了以下的进一步分析。实验组与对照组在同一沙垄部位, 同一土壤层次有机质含量的差异显著性检验表明: 在同一沙垄部位, 实验组 0~5cm 土层有机质含量与对照组 0~5cm 土层有机质含量差异极显著(t 检验, $df = 14$, $p < 0.01$) (表 3), 说明结皮覆盖区表层 0~5cm 土层有机质含量极显著地高于无结皮覆盖区表层 0~5cm 的有机质含量, 说明尽管地表有机质积累的规律与生物结皮的存在与否关系不大, 但生物结皮却强烈影响着地表 0~5cm 土层有机质的含量, 它的存在使得该层有机质含量极显著地高于无结皮覆盖区 0~5cm 土层的有机质含量; 而实验组与对照组相比, 两者在 5~10cm 土层之间和 10~30cm 土层之间的有机质含量均较为一致, 且无显著差异(表 3), 基本不受生物结皮存在与否的影响, 说明生物结皮对土壤有机质含量的影响范围仅限于表层 0~5cm, 而对更深层次土壤的有机质含量则无显著影响。

3 讨论

从广义上来说, 生物结皮的产生与发展过程也是最原始的植被初生演替的过程。在经历了一系列物理、化学和生物学特性的变化之后, 荒漠土壤便具备了植物生长的基本要素和条件, 为下一步的演替进程奠定了坚实的基础。

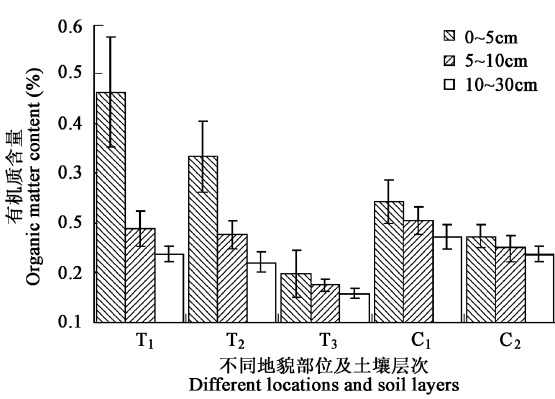


图 3 沙垄不同部位、不同层次土壤有机质含量

Fig 3 The change of SOM content in different soil layers from different locations of sand dunes

T 实验组 Refers to treatment samples: T₁ 丘间苔藓-地衣结皮 Moss-lichen crust from inter-dune, T₂ 坡部藻结皮 Algae crust from slope of sand dune, T₃ 垄顶流沙 Top of sand dune; C 对照组 Control samples: C₁ 丘间无结皮区 Bare soil from inter-dune, C₂ 坡部无结皮区 Bare soil slope of sand dune

表 2 沙丘不同部位各土壤层次之间有机质含量的 ANOVA 方差分析

沙垄部位 Location	实验组 Treatment				对照组 Control			
	平方和	自由度	F 值	P	平方和	自由度	F 值	P
	Square sum	df	F value		Square sum	df	F value	
丘间低地 Inter-dune	0.632	23	37.405	0.000	0.0442	23	9.559	0.001
沙坡中部 Slope of dune	0.214	23	109.938	0.000	0.0152	23	5.49	0.012
沙垄顶部 Top of dune	0.0104	23	16.852	0.000	—	—	—	—

表 3 不同土壤层次之间有机质含量的 t 检验

沙垄部位 Location	土壤层次 Soil layer	实验组 Treatment		对照组 Control		t-test
		平均值 Mean	标准差 S.E.	平均值 Mean	标准差 S.E.	
		平方和	自由度	平方和	自由度	
丘间低地 Inter-dune	0~5cm	0.4643	0.1117	0.2442	0.0443	5.80**
	5~10cm	0.1882	0.0714	0.2053	0.0272	0.63 ^{NS}
	10~30cm	0.1381	0.0470	0.1717	0.0243	1.80 ^{NS}
沙坡中部 Slope of dune	0~5cm	0.3345	0.0352	0.1736	0.0237	10.71**
	5~10cm	0.1771	0.0283	0.1500	0.0255	2.01 ^{NS}
	10~30cm	0.1215	0.0248	0.1381	0.0145	1.63 ^{NS}

* * $p < 0.01$, 差异极显著 significant difference; ^{NS} $p > 0.05$, 差异不显著 no significant difference

生物结皮的存在对土壤有机质含量的影响有其一定的生物学基础, 主要包括藻结皮、地衣结皮和苔藓结皮等类型^[30]。其中, 藻结皮是荒漠、半荒漠地区土壤拓殖演替中的重要结构, 同时也是固沙的首要标志, 对土壤抗侵蚀性能的提高有着显著功效^[31, 32]。藻类植物一旦在土壤和沙漠中大量生长, 它们就能向体外分泌以多糖为主的物质, 从而黏结土壤颗粒和沙粒, 形成早期的生物结皮。同时, 死亡的藻体又成为土壤有机物, 为固氮微生物和其它异养微生物的生长提供碳源。在提供有机质和增加含氮量(主要由固氮蓝藻完成), 防止土壤侵蚀、沙漠化以及沙丘固定等方面起着重要作用^[33, 34]。生物结皮中的地衣植物具有黏结土壤的构造, 如菌丝、根菌束和假根等, 它们能穿透沙土表层, 进入土壤下层 4~5mm 的位置, 有些种类的假根可深达 14mm^[34, 35]。这些深入土壤下层的菌丝或假根又可以将片段的叶状体紧密地连接起来, 形成较稳定的沙面地衣结皮, 同时还能通过它们的连接把土壤颗粒和土壤微生物联系在一起, 从而形成土壤、生物的有机复合体。尽管这些结构是否具有水分和养分

的运输功能尚不十分清楚,但它们能将地衣植物体牢牢的与土壤相连,对土壤有机质的增加和抵御水蚀、风蚀等具有重要的意义^[27]。生物结皮中的苔藓植物,作为整体在群落演替的过程中起着十分重要的作用。这些小型绿色植物是许多初生演替阶段的先锋种,它们通常群集在开阔、多贫瘠、且多是维管植物无法生存的地方。苔藓植物和地衣一旦定居以后,由于加速了物质风化速度、累积风尘物质包括植物的一些必要元素(如 K、P 和 S)而提高了土壤的形成速度。同时由于有机质的积累、微生物的侵入,使基质中养分的可利用性提高^[36, 37]。当有机层达到足够厚度时,草本和木本植物便可侵入。

由此可见,在生物结皮发育的不同阶段,不同结皮类群对土壤有机质积累所发挥的作用不尽相同,但都能够在一定程度上增加有机质的含量。本文的研究定量地揭示了这一规律,为理解生物结皮在荒漠生态系统中的重要作用提供理论依据。

新疆古尔班通古特沙漠是我国最大的固定和半固定沙漠,其间广泛发育着以地衣植物为主的生物结皮,是除种子植物以外的固定沙面的重要生物因子。本文研究证实,该沙漠典型沙垄各部位地表有机质的分布规律表现为:无论是结皮覆盖区还是非覆盖区,土壤有机质的积累均以表层 0~ 5cm 土层为主,由表及里呈递减趋势。方差分析表明,这种地表有机质分布的规律在该沙漠地表普遍存在。虽然如此,进一步的分析却表明:生物结皮却强烈影响着地表 0~ 5cm 土层有机质的含量,它的存在使得该层有机质含量极显著地高于无结皮覆盖区 0~ 5cm 土层的有机质含量,也就是说生物结皮能显著增加地表 0~ 5cm 土层的有机质含量。而无论结皮覆盖区还是非结皮覆盖区,其 5~ 10cm 和 10~ 30cm 土层的有机质含量较为一致,无显著差异,说明生物结皮对土壤有机质含量的影响范围仅限于表层 0~ 5cm,对更深层次土壤的有机质含量则无显著影响。

生物结皮能够增加地表 0~ 5cm 土层中的有机质含量对于该沙漠中普遍发育的一年生浅根系草本植物来说具有重要的生态学意义,这种生物结皮影响下的有机质分异特征可能为这些植物种子萌发与植物体的生长提供丰富的有机质源,从而有利于这些植物种群的繁衍与更新。在古尔班通古特沙漠,这些 1 年生浅根系草本植物与生物结皮共同对沙面的固定发挥着重要的生态作用。

References

- [1] Nash T H, White S L, Marsh J E. Lichen and moss distribution and biomass in hot desert ecosystems. *The Bryologist*, 1979, **80**: 470~ 479.
- [2] Loria M, Hermsstad I. Moss capsules as food for the harvest ant, *Messor*. *The Bryologist*, 1980, **83**: 524~ 525.
- [3] Belnap J, Harper K T and Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: nitrogenase activity, chlorophyll content and chlorophyll degradation. *Arid Soil Res Rehabil*, 1994, **8**: 1~ 8.
- [4] Friedmann E I, Galun M. Desert algae, lichens and fungi. In: Brown G W ed. *Desert Biology*. New York: Academic Press, 1974. 165 ~ 212.
- [5] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, **20**: 179~ 223.
- [6] Belnap J. Surface disturbances: their role in accelerating desertification. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, **37**: 39~ 57.
- [7] Cameron R E. Desert algae: soil crusts and diaphanous substrata as algae habitats. *Jet Propulsion Lab Technical Report*, 1966, **32**: 1~ 41.
- [8] Belnap J, Gardner J S. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *Great Basin Nat*, 1993, **53**: 40~ 47.
- [9] Stoddard L A, Smith A D and Box T W. *Range Management*. New York: McGraw-Hill, 1943. 532.
- [10] Daubenmire R. Steppe vegetation of Washington. *Agricultural Experiment Station Technical Bulletin No. 62*, Washington State Pullman: University, 1970. 131.
- [11] Hironaka M, Fosberg M A, Winward A H. Sagebrush-grass habitat types of southern Idaho. University of Idaho Forest, Wildlife and Range Experiment Station Bulletin No. 35, Moscow, University of Idaho, 1983. 44.
- [12] 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. *Australia Journal of Soil Research*, 1994, **32**: 389~ 415.
- [13] Townshend J R, Justice C O. Analysis of dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **12**: 1224~ 1242.
- [14] Li X R, Jia Y K, Long L Q, et al. Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semi-arid region. *Journal of Desert Research*, 2001, **21**(1): 4~ 12.
- [15] Yang X H. Microbiotic soil crust—A research forefront in desertification prone areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(3): 474~ 480.
- [16] Harper K T, Marble J R. A role for nonvascular plants in management of arid and semi-arid rangeland. In: Tueller P T, ed. *Vegetation Science Applications for Rangeland Analysis and Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 135~ 169.

- [17] Friedmann E I, Ocampo-Paus R. Endolithic blue-green algae in the dry valley: primary producers in the Antarctic Desert ecosystem. *Science*, 1976, **193**: 1247~ 1249
- [18] Townshend J R, Justice C O. Analysis of dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **12**: 1224~ 1242
- [19] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crust: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [20] Eldridge D J, Bradstock R A. The effect of time since fire on the cover and composition of cryptogamic soil crust on a eucalypt shrubland soil. *Cunninghamia*, 1994, **3**: 521~ 527.
- [21] Eldridge D J, Ferris J. Recovery of populations of the soil lichen *Psora crenata* after disturbance in arid South Australia. *The Rangeland Journal*, 1999, **21**: 194
- [21] Eldridge D J. Trampling of microphytic crusts on calcareous soils and its impact on erosion under rain-impacted flow. *Catena*, 1998, **33**: 221~ 239
- [22] Anderson D C, Harper K T, Rushforth S R. Recovery of cryptogamic soil crust from grazing in Utah deserts. *Journal of Range Management*, 1982, **35**: 180~ 185
- [23] Callison J, Brotherson J D, Bowns J E. The effects of fire on the blackbush (*Coleogyne ramossima*) community of southwest Utah. *Journal of Range Management*, 1985, **38**: 535~ 538
- [24] Jeffries D L, Klopatek J M. Effects of grazing on the vegetation of the blackbrush association. *Journal of Range Management*, 1987, **40**: 390~ 392
- [25] Cole D N. Trampling disturbance and recovery of cryptogamic soil crusts in Grand Canyon National Park. *Great Basin Nat*, 1990, **50**: 321~ 325
- [26] Belnap J, Warren S. Measuring restoration success: a lesson from Patton's tank tracks. *Ecological Bulletin*, 1998, **79**: 33
- [27] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecological Environments*, 2003, **1**(5): 181~ 189
- [28] Zhang L Y, Chen C D. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22** (11): 1923~ 1932
- [29] Zhang Y M, Cao T, Pan B R. A study on bryophyte associated with formation of soil crust in south fringe of Gurbantunggut Desert in Xinjing. *Acta Botanica Sinica*, 2002, **22**(1): 18~ 23
- [30] Booth W E. Algae as pioneers in plant succession and their importance in erosion control. *Ecology*, 1941, **22**(1): 38~ 46
- [31] Eldridge D J, Tozer M E. Distribution and floristics of bryophytes associated with soil crust in arid and semi-arid New South Wales, Australia. *Journal of Botany*, 1996, **44**: 223~ 247.
- [32] Zhou Z G, Chen Z J, Liu Z L. Study on the ecology of algae in surface crust of desert. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(4): 385~ 391
- [33] Eldridge D J, Tozer M E. Environmental factors relating to the distribution of terricolous bryophytes and lichens semi-arid eastern Australia. *The Bryologist*, 1997, **100**(1): 28~ 39
- [34] Poelt J. Über Rhizinenstränge bei placodialen Flechten. *Osterr Bot Z*, 1964, **111**: 1~ 18
- [35] Sanders W B. Role of Lichen rhizomorphs in thallus propagation and substrate colonization. *Cryptogam Bot*, 1994, **4**: 283~ 289
- [36] Smith E P. Niche breadth, resource availability, and inference. *Ecology*, 1982, **63**: 1675~ 1681
- [37] Syers J K, Iskandar I K. *Pedogenetic significance of lichens*. In: Ahmadjian V and Hale M E, eds. *The Lichens*. New York: Academic Press, 1973. 225~ 248

参考文献:

- [14] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 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. *中国沙漠*, 2001, **21**(1): 4~ 11
- [15] 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题. *生态学报*, 2001, **21**(3): 474~ 480
- [28] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 2002, **22**(11): 1923~ 1932
- [29] 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤结皮中苔藓植物的研究. *西北植物学报*, 2002, **22**(1): 18~ 23
- [32] 周志刚, 程子俊, 刘志礼. 沙漠结皮中藻类生态的研究. *生态学报*, 1995, **15**(4): 385~ 391