

# 不同程度干扰下人工固沙植被区生物结皮对草本植物生长的影响

富远年<sup>1</sup>, 马风云<sup>2</sup>, 刘立超<sup>3</sup>

(1. 武威市林业技术服务中心, 甘肃 武威 733000; 2. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018;  
3. 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, 兰州 730000)

**摘 要:**通过对沙坡头人工固沙植被区不同类型的生物结皮进行不同程度的人工干扰,对生长在结皮上的两种草本植物雾冰藜和小画眉草的繁衍和生长进行了研究。结果表明:与未受干扰的对照相比,轻度干扰下 3 种类型生物结皮上雾冰藜的密度、冠幅、高度、根系长度和生物量都有显著增加,重度干扰下 3 种类型结皮上的雾冰藜生长有所增加,密度则显著下降;轻度干扰下苔藓和藻类苔藓混生结皮上的小画眉草生长有所增加,密度基本未变,藻类结皮上小画眉草密度和生长都无显著变化。重度干扰下苔藓和藻类苔藓混生结皮上的小画眉草生长有所增加,密度和生长量下降。同时分析讨论了两种维管束植物在生物结皮受到干扰时不同表现的机理。

**关键词:**人工固沙植被; 生物结皮; 干扰; 维管束植物

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0087-04

## Influence of Biological Soil Crust Incurred Different Intensities of Disturbance on Herbal Plants in Artificial Fixed-Dunes Area

FU Yuan-nian<sup>1</sup>, MA Feng-yun<sup>2</sup>, LIU Li-chao<sup>3</sup>

(1. Wuwei Forestry Technique Service Center, Wuwei, Gansu 733000, China;  
2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China;  
3. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Biological soil crusts exist in a wide variety of environments around the world. It serves as an important biological factor contributing to the sand fixation. Disturbances are also widely existing phenomena in any ecosystem, especially in arid and semiarid areas in our country, where under the pressure of human population, disturbances such as grazing and trampling have important influences on the ecosystem. Our objective was to learn the influences of different disturbances for biological soil crusts on vascular plants by experiments of imitation disturbances set in artificial fixed-dunes area in Shapotou region. The results showed: the density, average crown, height, root length, and biomass of *Bassia dasyphylla* grown on three types of biological soil crusts increased significantly with the crusts being slightly disturbed. When the crusts were severely disturbed, the growth of *Bassia dasyphylla* increased moderately, while the density decreased. Under the circumstance of slight disturbance, the density and growth of *Eragrostis minor* grown on the moss crusts as well as on the the algae-moss crusts increased slightly and its density did not change significantly. *Eragrostis minor* grown on the algae crusts did not vary considerably in growth and density. With severe disturbance, *Eragrostis minor* grown on the moss crusts as well as on the algae-moss crusts increased slightly in height and decreased greatly in density and biomass. The growth and density of *Eragrostis minor* grown on the algae crusts did not change significantly. The mechanism of the different results of these two herbal plants was analyzed after the crusts were disturbed.

**Key words:** artificial fixed-dunes vegetation; biological soil crust; disturbance; vascular plant

生物结皮广泛存在于世界各地,尤其在干旱、半干旱地区更是如此<sup>[1]</sup>。干旱地区的生物结皮是由蓝细菌、绿藻、真菌、地衣和苔藓等组成的复杂的镶嵌体,对流动的沙粒有固定作用<sup>[2]</sup>。生物结皮的存在对土壤水分、有机质含量、营养库、径流、渗透、抵抗力的侵蚀、种子的萌发等都有重要的影响和作用<sup>[3-6]</sup>。由于它的特有性质和重要作用,生物结皮受到土地管理者和研究沙漠的生态学家越来越多的关注。关于生物结皮对维管束植物影响的研究有很多,有一种倾向认为生物结皮对维管束植物应有正面的影响,但从试验的结果来看并不一致。一些试验结果支持有正的影响<sup>[7-8]</sup>,而另一些试验结果表明有负的影响<sup>[9-10]</sup>。虽然很多研究阐述了生物结皮对维管束植物的影响,但很少有研究将放牧和踩踏对维管束植物的影响考虑进去。而实际上生物结皮对干扰的破坏很脆弱,干扰引起的变化可能对维管束植物生长造成一定影响。

干扰是任何生态系统广泛存在的一种现象,在我国干旱区、半干旱区,由于受到人口的压力,放牧、人为踩踏等干扰对区生态系统的影响尤为严重。虽然世界各地的学者对干旱、半干旱地区生物结皮影响草本植物的生长进行了很多的研究,但对人工固沙植被区形成的结皮在不同干扰下对草本植物生长的影响研究极少。沙坡头人工固沙植被建立后,在其保护方面也有两种意见,有人认为可以进行放牧等干扰,因为这样可促进草本植被的生长;而另外一些人则认为由于该人工固沙生态系统很脆弱,要严格进行保护。由于该地区气候及人工植被的特殊性,其他地区的经验不可能照抄照搬,尤其是不同干扰对不同结皮类型的研究又较少,因此非常有必要对沙坡头人工固沙植被区不同类型生物结皮在不同强度干扰下对植被,尤其草本植被的影响进行研究。对沙坡头人工固沙植被区不同的生物结皮类型实施不同程度的干扰,调查不同程度干扰下各种类型的生物结皮对草本植物的影响,以期对沙坡头的人工植被管理提供可以参考的数据。

## 1 研究地区和研究方法

### 1.1 自然概况

腾格里沙漠东南缘的宁夏沙坡头地区(105°02'E, 37°32'N)海拔高度 1 339 m,属于草原化荒漠地带,也是沙漠与绿洲的过渡带,以高大、密集的格状新月形沙丘链连绵分布而著称;土壤基质为疏松、贫瘠的流沙,沙层稳定含水量仅为 2%~3%;天然植被以花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)为主,盖度 1%左右。自 1956 年建立人

工植被防护体系以来,该地区的生态环境得到改善,沙面的固定为 1 年生植物的繁衍创造了条件,现阶段有昆虫 314 种,真菌约 9 种。大量的微生物得到发育,并在沙面上形成了生物结皮。此外,鸟类多达 65 种,其中繁殖鸟 60 种,鼠类 9 种,其他动物 30 余种。由于大量物种的繁衍和定居,使原有的流沙变成了一个复杂的人工—天然荒漠植被景观。

### 1.2 研究方法

试验地选择在沙坡头人工固沙植被区有固定围栏保护的区域内。由于生物结皮发育的时间不同以及地形的不同,不同区域分布的结皮类型也不同。本试验根据生物结皮的特点将结皮分为 3 种类型:苔藓结皮、藻类苔藓混生结皮和藻类结皮。在每种类型结皮存在地段分别设置 2 m×2 m 的样方 15 个,每个种类的结皮样方中 5 个样方做轻度干扰处理(5 个重复),5 个样方做重度干扰处理,5 个样方不破坏结皮作为对照。轻度干扰为人为用脚踩碎或用铁锹破碎样方内的结皮,重度干扰为直接去除样方内的结皮,对照为自然状态的结皮样方。干扰的实施在头一年草本植物完全枯萎后进行。植被调查在干扰实施后第二年进行。调查样方内主要草本植物雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和小画眉草(*Eragrostis minor*)(两种草本植物均为一年生草本植物,以种子繁殖)的密度、冠幅、高度、根系长度和生物量时,在大样方中选择 5 个 20 cm×20 cm 的小样方,在小样方中测定每种植物的密度及每一株植物的高度,并收获样方内的所有植物带到试验室烘干称重,对比分析不同生物结皮在不同干扰下对维管束植物生长的影响。数据用 SPSS 软件做方差分析处理。

### 1.3 试验地生物结皮基本概况

试验选取的藻类结皮发育年限 4 a,覆盖度 65%,优势种为蓝藻和绿藻,草本植物优势种为雾冰藜;藻类苔藓混生结皮发育年限 22 a,覆盖度 80%,优势种为真藓,草本植物优势种为雾冰藜;苔藓结皮发育年限 29 a,覆盖度 96%,优势种为对齿藓,草本植物优势种为小画眉草。三种结皮上灌木植物优势种均为油蒿、柠条。

## 2 结果与分析

### 2.1 受干扰苔藓结皮对草本植物的影响

如表 1 所示,生长在苔藓结皮上的雾冰藜在受到轻度干扰时,密度、冠幅、地上高度、根系长度和总生物量都比无干扰时显著增加,其中平均密度增长了 63.9%,平均冠幅增加了 48.4%,平均高度增长了 220.5%,平均根系长度增加了 31.8%,平均生物量

增加增长了 490.6%。经方差分析检验达到了极显著水平( $P<0.01$ )。重度干扰的结皮上雾冰藜与无干扰对照相比密度减少了 184.2%，冠幅增加了 54.8%，高度增加了 270.5%，根系长度增加了 39.8%，差异达到了极显著水平，生物量和无干扰时无显著差异( $P<0.05$ )。生长在苔藓结皮上的小画眉草在结皮轻度干扰时密度略有下降，但未达到差异

显著( $P<0.05$ )，冠幅增加了 42.2%，平均高度增加了 37.8%，根系长度增加了 26.1%，生物量增加了 20.8%，差异达到了显著水平( $P<0.05$ )。结皮受到重度干扰时小画眉草的密度与无干扰的对照相比较下降了 597.8%，冠幅增加了 35.6%，高度增加了 29.7%，生物量下降了 323.5%。差异均达到显著水平( $P<0.05$ )，详见表 1。

表 1 生长在苔藓结皮上的雾冰藜和小画眉草在不同干扰下的差异

干扰程度	密度/(株·m <sup>-2</sup> )		冠幅/cm		高度/cm		根系长度/cm		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草
轻度干扰	885.0A	740.8a	4.6A	6.4a	14.1A	5.1a	11.6A	5.8a	782.3A	217.5a
重度干扰	196.1B	112.5b	4.8A	6.1a	16.3B	4.8a	12.3B	6.7b	145.5b	42.7b
无干扰	540.7C	785.4a	3.1B	4.5b	4.4C	3.7b	8.8C	4.6c	132.7B	180.5c

注:字母大小写分别表示差异极显著、显著,下同。

2.2 受干扰藻类苔藓混生结皮对草本植物的影响

生长在藻类苔藓混生结皮上的雾冰藜在受到轻度干扰时,密度、冠幅、地上高度、根系长度和总生物量都比无干扰时显著增加,其中平均密度增长了 70.5%,平均冠幅增加了 37.8%,平均高度增长了 104.6%,平均根系长度增加了 42.3%,平均生物量增加了 504.3%。达到了极显著水平( $P<0.01$ )。重度干扰的结皮上雾冰藜与无干扰对照相比密度减少了 115.3%,冠幅增加了 31.7%,高度增加了 137.9%,根系长度增加了 46.2%,生物量增加了 19.6%,差异达

到了显著水平( $P<0.05$ )。生长在苔藓结皮上的小画眉草在结皮轻度干扰时密度略有上升,但未达到差异显著( $P<0.05$ )，冠幅增加了 32.7%，平均高度增加了 14.0%，根系长度增加了 22.1%，生物量增加增长了 12.9%，差异达到了显著水平( $P<0.05$ )。结皮受到重度干扰时小画眉草的密度与无干扰的对照相比较下降了 475.6%，冠幅增加了 25.0%，高度增加了 18.6%，生物量下降了 200.0%。差异均达到显著水平( $P<0.05$ )，详见表 2。

表 2 生长在藻类苔藓混生结皮上的雾冰藜和小画眉草在不同干扰下的生长状况

干扰程度	密度/(株·m <sup>-2</sup> )		冠幅/cm		高度/cm		根系长度/cm		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草
轻度干扰	780.8A	642.5a	6.2A	6.9a	13.5A	4.9a	14.8A	7.2a	695.5A	125.1a
重度干扰	212.5b	102.1b	5.9a	6.5a	15.7a	5.1a	15.2A	7.7a	137.5b	45.8b
无干扰	457.3C	590.3a	4.5B	5.2b	6.6B	4.3b	10.4B	5.9b	115.7C	135.4c

2.3 受干扰藻类结皮对草本植物的影响

生长在藻类结皮上的雾冰藜在受到轻度干扰时,密度、冠幅、地上高度、根系长度和总生物量也都比无干扰时有显著增加,其中平均密度增长了 83.3%,平均冠幅增加了 11.5%,平均高度增长了 59.5%,平均根系长度增加了 6.8%,平均生物量增加了 373.3%。达到了极显著水平( $P<0.01$ )。重度干扰的结皮上雾冰藜与无干扰对照相比密度减少了 97.4%，冠幅增加

了 18.0%，高度增加了 69.4%，根系长度增加了 6.5%，差异达到了显著水平( $P<0.05$ )。生物量略有减少,但未达到显著差异( $P<0.05$ )。生长在藻类结皮上的小画眉草在结皮轻度干扰时密度略有上升,但未达到显著差异( $P<0.05$ )，冠幅、平均高度、生物量的差异也均未到达显著水平,只有根系长增加了 22.1%，差异达到了显著水平( $P<0.05$ )。结皮受到重度干扰时小画眉草生长趋势基本与轻度干扰时相似(表 3)。

表 3 生长在藻类结皮上的雾冰藜和小画眉草在不同干扰下的差异

干扰程度	密度/(株·m <sup>-2</sup> )		冠幅/cm		高度/cm		根系长度/cm		生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	
	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草	雾冰藜	小画眉草
轻度干扰	715.5A	87.5a	6.8A	6.1a	11.8A	3.5a	14.1A	8.5a	532.5A	42.7a
重度干扰	197.9b	95.8a	7.2a	5.8a	12.2a	3.1a	14.6a	8.3a	107.3b	35.4a
无干扰	390.6C	102.1a	6.1B	5.5a	7.4B	3.3a	13.2B	6.8b	112.5B	30.2a

### 3 讨论

沙坡头人工固沙植被区苔藓结皮主要分布在丘间低地,其厚度较藻类结皮和藻类苔藓混生结皮都厚。未受干扰时生长在苔藓结皮上的雾冰藜其密度、高度和生物量都比较低,受到轻度干扰时,其密度、高度和生物量都有较大程度的增加,由此可见,结皮的存在对雾冰藜的繁殖和生长有较大的影响。在干旱少雨的沙漠地区生物结皮的存在对降水入渗的影响是十分明显的<sup>[11-12]</sup>。李守中<sup>[13]</sup>通过对该地区生物结皮的模拟实验指出固沙区生物结皮层降低了水分渗透的速度和深度,结皮的逐年发育使土壤水分的分配格局和分配过程发生了很大的变化,土壤水分的再分配有明显的浅层化趋势。生物结皮逐渐发育降低了土壤容重,并通过降低反射率和提高毛管作用增加了蒸发<sup>[13-15]</sup>。因此,生物结皮的存在提高了表层土壤的持水能力,造成水分浅层化<sup>[16]</sup>,进而影响了草本的生长,造成雾冰藜生长量下降。干扰对另一种草本植物小画眉草的改变却不十分明显,生长量增加幅度不大。造成这种结果的原因可能是由于二者的根系差异所致。从二者的根系比较来看,雾冰藜根系较深,对较深层水分要求多,当结皮受到干扰下渗水分增多时,就促进了雾冰藜的生长。小画眉草的根系较浅,主要利用较浅层的水分,因而结皮受干扰后深层水分增加对它的生长影响也不大。

3 种类型的生物结皮受到轻度干扰时雾冰藜的密度增加,重度干扰下密度下降。而小画眉草在受到轻度时密度变化不大,重度干扰时苔藓结皮和藻类苔藓混生结皮上密度变小,只有藻类结皮上密度无变化。在我们的试验中有 3 种不同类型的结皮和两种草本植物雾冰藜和小画眉草,雾冰藜的种子较大,呈五角星状,3 种类型的结皮受到轻度干扰后密度都显著增加,这是由于干扰后表面粗糙度增加,容易截留雾冰藜种子,因而使其密度增加。重度干扰主要模拟由于在固沙区常发生的人工施工使结皮完全被移除的情况。重度干扰下由于结皮被全部移走,使原来地块上种子大为减少,也就是减少了结皮上的种子库,因而密度下降很多,再加上表层结皮去除后露出土层或沙层,风力作用下带来的种子不容易在其上停留,因此受到重度干扰的样方雾冰藜密度很小。3 种结皮受到轻度干扰时小画眉草的密度无显著增加,可能是因为小画眉草种子很小,虽然轻度干扰时粗糙的表面可以拦截一部分种子,但有一部分种子可能由于埋藏较深而不能发芽,因而会使密度降低。3 种类型的结皮以苔藓结皮上的雾冰藜受到轻度干扰时密度、高

度和生物量变化最大。

本试验结果表明轻度干扰对草本植物密度、高度和生物量的影响与具体植物本身的生物学特性有关,对于种子大、根系深、适生于沙性土壤的雾冰藜,轻度干扰对其影响较大。对于种子小、根系浅、适生于发育较好土壤的小画眉草,则影响较小。重度干扰严重影响两种植物密度,虽然高度增加,但总生物量有较大幅度下降。因此在人工固沙植被管理时适度干扰是可以允许的,但重度的干扰应绝对禁止,因为重度干扰不仅影响维管束植物的繁殖和生长,对土壤的表面稳定性也造成极大的破坏,会导致固沙植被系统严重退化甚至引起重新沙化。本次试验实施的干扰是一次性的,对不断干扰下的结皮对草本植物的影响应进一步试验来探讨,也需要更多的试验来揭示结皮和草本植物之间的作用机理。

### 4 结论

(1)轻度干扰下 3 种类型生结皮上雾冰藜的密度、冠幅、高度、根系长和生物量都有显著增加,重度干扰下 3 种类型结皮上的雾冰藜生长有所增加,密度则显著下降。

(2)轻度干扰下苔藓和藻类苔藓混生结皮上的小画眉草生长有所增加,密度基本未变,藻类结皮上小画眉草密度和生长都变化不大。重度干扰下苔藓和藻类苔藓混生结皮上的小画眉草生长有所增加,密度和生长量下降。

(3)生物结皮的轻度干扰能增加对降水的渗透,在一定程度上促进了一年生植物的生长,所以在人工固沙植被区管理中可允许适度的干扰。重度干扰严重影响一年生植物的定居和生长,对植被的破坏作用较大,应绝对禁止。

参考文献:

- [1] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions[J]. Adv. Ecol. Res., 1990, 20: 179-223.
- [2] WU Nan, WANG Hongling. Temporal-spatial dynamics of distribution patterns of microorganism relating to biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert[J]. Bulletin of Chinese Science, 2006, 51(S1): 124-131.
- [3] Belnap J. Potential role of cryptobiotic soil crust in semi-arid rangelands[M]//Monsen S B. Proceedings-Ecology and Management of Annual Rangelands. Ogden: USDA Forest Service International Research Station, 1994: 175-185.

(下转第 95 页)

用政策、法规等因素影响,而马尔柯夫模型是由过去土地利用类型的转移概率来模拟分析未来变化的趋势,其预测精度会有一定的局限性。在今后的研究中,可结合其他预测方法进行比较印证,使预测精度更加准确和科学。

#### 参考文献:

- [1] 孙希华. 济南泉域土地利用动态变化及驱动力研究[J]. 国土资源遥感, 2004(1): 60-64.
- [2] 赵小汎, 沈润平. 空间分析在土地利用/土地覆被变化机制研究中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(2): 304-308.
- [3] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87.
- [4] 杨子生, 贺一梅, 李云辉, 等. 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究: 以云南宾川县为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 16-26.
- [5] 全斌, 朱鹤健, 晏路明, 等. 厦门岛土地利用变化趋势预测[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 98-104.
- [6] 熊云波, 吴玉鸣. GIS支持下土地利用空间演变过程的马尔可夫模拟研究: 以上海市中心城区为例[J]. 南阳师范学院学报: 自然科学版, 2002, 1(6): 87-92.
- [7] 王鹏, 曹学章, 董杰. 三峡库区土地利用变化的特征与趋势[J]. 资源开发与市场, 2004, 20(6): 433-435.
- [8] 周庆, 欧晓昆, 张志明, 等. 澜沧江漫湾水电站库区土地利用格局的时空动态特征[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 481-489.
- [9] 王娟, 崔保山, 刘杰, 等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 269-277.
- [10] 解修平, 周杰. 土地利用变化预测研究: 以西安地区为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 125-130.
- [11] 杨子生, 李云辉, 邹忠, 等. 中国西部大开发云南省土地资源开发利用规划研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- [12] 陈龙泉, 郑海金. 基于 Markov-CA 的土地利用/土地覆盖变化动态模型研究[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(1): 36-38.
- [13] 李忠锋, 王一谋, 冯毓荪, 等. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区土地利用变化分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 97-99.
- [14] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 北京地区土地利用/覆盖变化研究[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 679-687.
- [15] 蒙古军, 吴秀芹, 李正国. 河西走廊土地利用/覆盖变化的景观生态效应: 以肃州绿洲为例[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2535-2541.
- [16] 赵庚星, 李强, 李玉环, 等. GIS 支持下的马尔柯夫链模型模拟垦利县土地利用空间格局变化[J]. 地理科学进展, 1999, 30(4): 345-349.
- [17] 宋轩, 石端晓, 张学雷, 等. 基于元胞自动机的郑州市区土地利用变化研究[J]. 河南科学, 2008, 26(8): 971-976.

(上接第90页)

- [4] Beymer R J, Klopatek J M. Effects of grazing on cryptogamic crusts in pinyon-juniper woodlands in Grand Canyon National Park[J]. Am. Midl. Naturalist, 1992, 127: 139-148.
- [5] Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microbiotic crust cover: further evidence from a wooded semiarid Australia rangeland[J]. Arid Soil Res Rehabil., 1997, 11: 113-126.
- [6] McKenna-Neuman C, Maxwell C D, Boulton J W. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms[J]. Catena, 1996, 27: 229-247.
- [7] St. Clair L L, Webb B L, Johansen J R, et al. Cryptogamic soil crusts: Enhancement of seedling establishment in disturbed and undisturbed areas[J]. Reclamation Revegetation Res., 1984, 3: 129-136.
- [8] Harper K T, Pendleton R L. Cyanobacteria and Cyanolichens: Can they enhance availability of essential minerals for higher plants[J]. Great Basin Nat., 1993, 53: 59-72.
- [9] McIlvanie S K. Grass seedling establishment and productivity-overgrazed vs. protected range soils[J]. Ecology, 1942, 23: 228-231.
- [10] Sylla D. Effect of microphytic crust on emergence of range grasses. MSc-Thesis, School of renewable natural resources[D]. USA: The University of Arizona, 1987.
- [11] 李新荣, 张景光, 王新平, 等. 沙漠地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(增刊): 165-169.
- [12] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616.
- [13] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 228-233.
- [14] 李守中, 郑怀舟, 李守丽, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮的发育特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 165-167.
- [15] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 404-410.
- [16] 陈荷生. 沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及其环境意义[J]. 干旱区研究, 1992, 9(2): 31-38.