

网络出版时间:2017-05-10 13:37

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.06.015

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170510.1337.030.html>

黄土丘陵区不同类型生物结皮下土壤微生物的分布特征

胡忠旭^{1,2}, 赵允格², 王一贺²

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 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)

【摘要】【目的】分析黄土丘陵区不同类型生物结皮的发育特征及土壤微生物的分布特征,以明确生物结皮形成过程对土壤微生物的影响。【方法】采用野外调查和室内分析相结合的方法,调查黄土丘陵区浅色藻结皮、深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮及藓结皮5类生物结皮的发育特征,并测定生物结皮层及结皮下0~2 cm土层的土壤微生物数量和化学性质,最后分析了不同生物结皮发育特征和土壤化学性质与土壤微生物数量之间的相关性。【结果】研究区浅色藻结皮、深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮及藓结皮的结皮厚度分别为1.13, 3.26, 6.31, 8.91, 12.61 mm, 藻盖度分别为100%, 98.67%, 71.61%, 27.33%, 7.80%, 藓盖度分别为0%, 0.80%, 24.90%, 65.87%, 81.30%。不同类型生物结皮土壤细菌数量占微生物总数的比例为53.12%~72.09%,放线菌所占比例为27.49%~46.80%,真菌所占比例为0.08%~0.92%。在生物结皮层,土壤微生物总数和细菌数量从浅色藻结皮到藓结皮总体呈增加趋势,藓结皮土壤细菌、放线菌和真菌数量显著高于其他生物结皮;在结皮下0~2 cm土层,土壤微生物总数和放线菌数量表现为藓结皮>浅色藻结皮>深色藻结皮>藓+少量藻结皮>藻+少量藓结皮,藓结皮土壤细菌、放线菌和真菌数量显著高于其他生物结皮。在生物结皮层,藓结皮土壤细菌比例较藻结皮有所增加,放线菌比例相应减少,藓结皮真菌比例最高;藓结皮下0~2 cm土层真菌比例显著大于其他生物结皮。垂直分布上,生物结皮层土壤细菌数量和比例、真菌数量和比例均大于结皮下0~2 cm土层,但放线菌数量和比例小于结皮下0~2 cm土层。在生物结皮层和结皮下0~2 cm土层,不同类型生物结皮土壤化学性质存在明显差异。生物结皮层微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量与藓盖度和结皮厚度呈显著或极显著正相关关系,放线菌比例与藓盖度和结皮厚度呈显著负相关关系。土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量和比例与土壤碳氮含量、碳氮比、电导率呈显著或极显著正相关关系,细菌数量和比例、真菌数量和比例与土壤pH值呈显著或极显著负相关关系。【结论】生物结皮对半干旱地区土壤微生物具有重要影响,藓结皮较其他生物结皮可显著提高土壤微生物数量。

【关键词】 生物结皮;发育特征;土壤微生物数量;土壤化学性质;黄土丘陵区

【中图分类号】 S154.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)06-0105-10

Distribution characteristics of soil microorganisms under different biological soil crusts in Hilly Loess Plateau, China

HU Zhongxu^{1,2}, ZHAO Yunge², WANG Yihe²

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Research Center of Institute of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences,

State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the developmental characteristics of different biocrusts in

【收稿日期】 2016-04-06

【基金项目】 中国科学院“西部之光”联合学者项目;国家自然科学基金项目(41271298, 41571268)

【作者简介】 胡忠旭(1990—),女,安徽滁州人,在读硕士,主要从事生物结皮土壤微生物研究。E-mail: 18949148122@163.com

【通信作者】 赵允格(1971—),女,陕西咸阳人,研究员,博士,博士生导师,主要从事生物结皮及其生态功能研究。

E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

Hilly Loess Plateau and the distribution of soil microorganisms to understand the effects of biocrusts development. **【Method】** Field survey and laboratory analysis were adopted to analyze the developmental characteristics of five biocrusts including light cyanobacteria crust, dark cyanobacteria crust, cyanobacteria with sparse moss crust, moss with tiny cyanobacteria patches crust, and moss crust. Soil chemical properties and microbial quantities in the depth of 0—2 cm were analyzed in laboratory and the relationships between these indexes were obtained. **【Result】** Thicknesses of biocrusts of light cyanobacteria crust, dark cyanobacteria crust, cyanobacteria with sparse moss crust, moss with tiny cyanobacteria patches crust, and moss crust were 1.13, 3.26, 6.31, 8.91, and 12.61 mm, cyanobacteria coverages of the five crusts were 100%, 98.67%, 71.61%, 27.33%, and 7.80%, and the moss coverages were 0%, 0.80%, 24.90%, 65.87% and 81.30%, respectively. Among the five types, bacterial ratios were 53.12%—72.09%, actinomycic ratios were 27.49%—46.80%, and fungal ratios were 0.08%—0.92%. The quantity of total microorganisms and bacteria in biocrust layer had a overall increased trend; the quantity of bacterial, actinomycetes and fungi in moss crust were higher than the other biocrustal types. In 0—2 cm soil layer, the quantity of total microorganisms and actinomycetes were showed like moss crust > light cyanobacteria crust > dark cyanobacteria crust > moss with tiny cyanobacteria patches crust > cyanobacteria with sparse moss crust, the quantity of bacteria, actinomycetes and fungi in moss crust were higher than the other biocrustal types. Bacterial ratio of moss crust in biocrust layer was higher than cyanobacteria crust, while actinomycetes ratio was different. The fungi ratio in moss crust was higher than in other types. In soil layer of 0—2 cm, there was no significant difference in ratio of bacteria and actinomycetes between biocrustal types, except that in moss crust was higher than in other types. The quantity and ratio of bacteria and fungi in biocrust layer were higher than that in 0—2 cm soil layer, but those of actinomycetes were opposite. In biocrust and 0—2 cm soil layer, significant differences were found in soil chemical properties between different biocrusts. Total microbial quantity, bacterial quantity, fungal quantity, and bacterial ratio were significantly positively correlated with moss coverage and biocrustal thickness. Actinomycic ratio was significantly negatively correlated with moss coverage and biocrustal thickness. The quantity of total microorganisms, bacteria and fungi, and ratios of bacteria and fungi were positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen, ratio of carbon to nitrogen, and electrical conductivity, while the quantity of bacteria and fungi, and the percentage of bacteria and fungi were negatively correlated with soil pH. **【Conclusion】** Biocrusts had significantly effects on quantity of microorganisms in the semi-arid region. Compared with other biocrust types, moss crust significantly increased soil microbial quantity.

Key words: biological soil crust; developmental characteristics; soil microbial quantity; soil chemical properties; Hilly Loess Plateau

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由隐花植物如蓝绿藻、地衣、苔藓类和土壤微生物以及其他生物体,通过菌丝体、假根和分泌物等与表层土壤颗粒胶结形成的复杂复合体,是干旱半干旱地区常见的生物地被物^[1]。生物结皮可增加表层土壤的水分拦截量和土壤养分含量、降低土壤 pH 值、影响土壤通气状况等^[1-3],被誉为“干旱半干旱生态系统工程师”。

微生物是土壤生态系统的重要组成部分,其数量及群落构成对环境变化敏感^[2]。干旱半干旱地区的生物结皮由于改变了土壤养分及水热状况^[4-6],因此可能会诱发土壤微生物群落的变化,进而影响土

壤结构的形成、养分转化以及土壤生态系统的稳定。探明生物结皮对微生物群落组成及分布的影响,对揭示生物结皮对土壤肥力、土壤环境以及养分转化与循环等的影响具有科学意义。然而,目前有关生物结皮对土壤微生物的影响多着眼于古尔班通古特沙漠^[7]、腾格里沙漠^[8]、毛乌素沙地^[9]等荒漠地区,在生物结皮广泛分布的黄土丘陵区尚鲜见报道^[10];同时,已有研究多侧重于单一的生物结皮有机体^[8-9]而非复杂的生物结皮群落。已有研究表明,在荒漠化地区,生物结皮土壤微生物数量显著高于流沙^[11],结皮层土壤微生物数量大于结皮下层土

壤^[10,12],土壤微生物的数量变化特征与生物结皮的类型、厚度以及土壤有机质含量等因子有一定的相关性^[12-14],表明生物结皮的形成可影响土壤微生物群落的组成及分布。

地处半干旱区的黄土丘陵区,由于退耕还林(草)工程的实施,生物结皮在该区退耕地广泛发育^[5],可能是影响土壤微生物的重要因子。此外,由于该区半干旱的气候特征,相对于荒漠化地区,土壤条件较好,因此生物结皮对土壤微生物群落及分布的影响可能不同于干旱的荒漠化地区,这种状况妨碍了人们科学认识退耕还林(草)生态工程对土壤生态系统的影响。为此,本试验通过对黄土丘陵区不同类型生物结皮土壤微生物数量和组成变化的研究,明确生物结皮形成过程对土壤微生物的影响,并结合有机质、全氮、pH 值等土壤环境因子的分析,以揭示生物结皮对土壤微生物分布特征的影响机制。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省安塞县纸坊沟流域(36°51′N、109°18′E),该地区为典型的黄土丘陵沟壑区,属暖温带半干旱季风气候。平均海拔 1 200 m,相对高差 100~300 m,年均气温 8.8℃,年均降水量 500 mm 左右,年内降水分配不均,7—9 月降水量约占年总降水量的 60%,且多暴雨;年日照时数 2 300~2 400 h,≥10℃积温 3 282℃,干燥度指数 1.48,无霜期 160 d 左右。

地带性土壤为黑垆土,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而来的黄绵土为主。植被区划上,属于森林草原的南部边缘,地带性植被为暖温性灌丛和草甸草原群落,主要分布有茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia scororum*)、狗尾草(*Setaira viridis*)和胡枝子(*Lespedeza* spp.)等群落。

退耕还林(草)工程实施后,生物结皮成为黄土丘陵区退耕地上普遍存在的地被物,广泛分布在植被间空地上,盖度可以达到 60%~70%,甚至更高^[5]。从形态上看,一般退耕 1~2 年的土壤,会出现浅色藻结皮,干燥时呈浅灰色,厚度 1~2 mm,在地表均匀分布;退耕 2~3 年者,土壤结皮以深色藻结皮为主,干燥时呈灰黑色,厚度 2~4 mm,在地表均匀分布,易剥离,杂有丛藓科植物原丝体;之后,随退耕年限的持续延长,藓类植物盖度增大,结皮厚度也随之增加,最后发育成以藓类为主的藓结皮,在地表分布的均匀性变差,干燥时呈黑灰色,湿水后呈绿色^[4]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 选择海拔、坡度、坡位等地理条件基本一致、生物结皮相对完整、人为扰动少的撂荒地作为研究对象,按研究区退耕地常见生物结皮类型,结合生物结皮中藓类(以短叶对齿藓(*Barbula tectorum* C. Muell)为主)的盖度,选取 5 类生物结皮(因该区地衣呈零星分布,且其盖度低于 10%,鲜见大面积连续分布,所以结皮类型划分中未涉及地衣结皮):浅色藻结皮,藓盖度为 0;深色藻结皮,藓盖度<20%;藻+少量藓结皮,藓盖度 20%~50%;藓+少量藻结皮,藓盖度 50%~70%;藓结皮,藓盖度>70%。在每类生物结皮样地中选取 3 个样地重复,样地间距至少大于 1 000 m,每样地布设 3 个 5 m×5 m 的样方,调查生物结皮盖度和生物结皮厚度。为避免种子植物和枯落物的影响,选择生物结皮斑块为采样点,采集生物结皮层和结皮下 0~2 cm 土样(预试验结果表明,生物结皮对土壤微生物的影响主要局限于生物结皮层和 0~2 cm 深土样上),每样地采集 15~20 个样点,按照“随机”、“等量”和“多点混合”的原则,采用“S”形布点采样,均匀混合装入无菌袋中,置保温箱中速带回实验室,将可见的植物残体等去除后,分为 2 份,一份风干,一份 4℃保存备用。样地基本情况见表 1。

表 1 本研究样地的基本情况

Table 1 General information of the study area

结皮类型 Biocrustal type	坡向 Aspect	植被群落 Vegetation	植被盖度/% Vegetation coverage
浅色藻结皮 Light cyanobacteria crust	阳坡 Sunny slope	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i>	5
深色藻结皮 Dark cyanobacteria crust	半阳坡 Half-sunny slope	长芒草、茵陈蒿 <i>Stipa bungeana</i> , <i>A. capillaries</i>	38
藻+少量藓结皮 Cyanobacteria with sparse moss crust	阳坡 Sunny slope	白羊草、铁杆蒿 <i>Bothriochloa ischaemum</i> , <i>Artemisia scororum</i>	40
藓+少量藻结皮 Moss with tiny cyanobacteria patches crust	阳坡 Sunny slope	铁杆蒿、白羊草 <i>A. scororum</i> , <i>B. ischaemum</i>	46
藓结皮 Moss crust	阴坡 Shady slope	铁杆蒿 <i>A. scororum</i>	55

1.2.2 测定项目及方法 (1)生物结皮盖度^[1]。采用 25 点样方法,在各样地的 5 m×5 m 样方中随机布设 10 个 25 cm×25 cm 小样方,调查记录各小样方中藓、地衣、藻等的出现频次,以各类物种占调查总点数的百分比计算其相应的盖度。

(2)生物结皮厚度。用小刀将生物结皮与下层土壤分离,游标卡尺测量 4 个方向的厚度,取平均值,每样品测 10 个重复。

(3)土壤化学性质。有机质、全氮、pH 值、电导率均采用文献[15]的方法测定。

(4)微生物的分离和计数。采用稀释涂布平板法统计。其中,细菌培养采用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌培养采用改良高氏一号培养基(临用时在已灭菌改良高氏一号培养基中加入重铬酸钾以抑制细菌和霉菌的生长,每 300 mL 加 30 g/L 重铬酸钾 1 mL),真菌培养采用马丁氏培养基。接种后的细菌培养基置于 28 ℃ 恒温培养箱中倒置培养,2 d 后计数;真菌培养 3~5 d 计数;放线菌培养 5~7 d 计数^[16]。

表 2 黄土丘陵区不同类型生物结皮的发育特征

Table 2 Developmental characteristics of different biocrusts in Hilly Loess Plateau

结皮类型 Biocrustal type	结皮厚度/mm Biocrustal thickness	藻盖度/% Cyanobacteria coverage	藓盖度/% Moss coverage	地衣盖度/% Lichen coverage
浅色藻结皮 Light cyanobacteria crust	1.13±0.04	100	0	0
深色藻结皮 Dark cyanobacteria crust	3.26±0.55	98.67±2.19	0.80±1.63	0
藻+少量藓结皮 Cyanobacteria with sparse moss crust	6.31±1.01	71.61±9.14	24.90±8.50	0
藓+少量藻结皮 Moss with tiny cyanobacteria patches crust	8.91±0.24	27.33±6.90	65.87±8.77	0.93±1.72
藓结皮 Moss crust	12.61±1.36	7.80±4.72	81.30±7.89	1.05±2.93

注:表中数据为“平均值±标准差”(n=30)。表 3 同。
Note:The values in the table are given as “mean values±SD”(n=30). The same for table 3.

2.2 不同类型生物结皮土壤微生物数量及组成变化

2.2.1 可培养土壤微生物总数 土壤中微生物数量越多、微生物群落活跃程度越高,一定程度上代表该生态系统具有越强的物质循环能力。图 1 显示,研究区不同类型生物结皮土壤微生物总数不同,其中藓结皮土壤微生物总数最高。在生物结皮层,随着藓盖度的增大,土壤微生物总数从浅色藻结皮到藓结皮总体呈增加趋势,藓结皮分别较藻结皮(浅色藻结皮和深色藻结皮)和混合结皮(藻+少量藓结皮和藓+少量藻结皮)平均增加了 0.71,0.33 倍,表明生物结皮的形成增加了土壤微生物数量。在结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤微生物总数显著高于其

1.3 数据统计与分析

采用 SPSS 18.0 统计软件,对不同类型生物结皮发育特征(厚度、盖度)及结皮层和结皮下 0~2 cm 土层土壤生物学性质(微生物总数、细菌数量、真菌数量和放线菌数量及对应比例)与化学性质(有机质、全氮、碳氮比、pH 值、电导率)进行单因素方差分析,并对不同类型生物结皮土壤生物学性质和化学性质进行 LSD 法多重比较($P<0.05$)。采用 SigmaPlot 12.5 软件完成相关绘图。

2 结果与分析

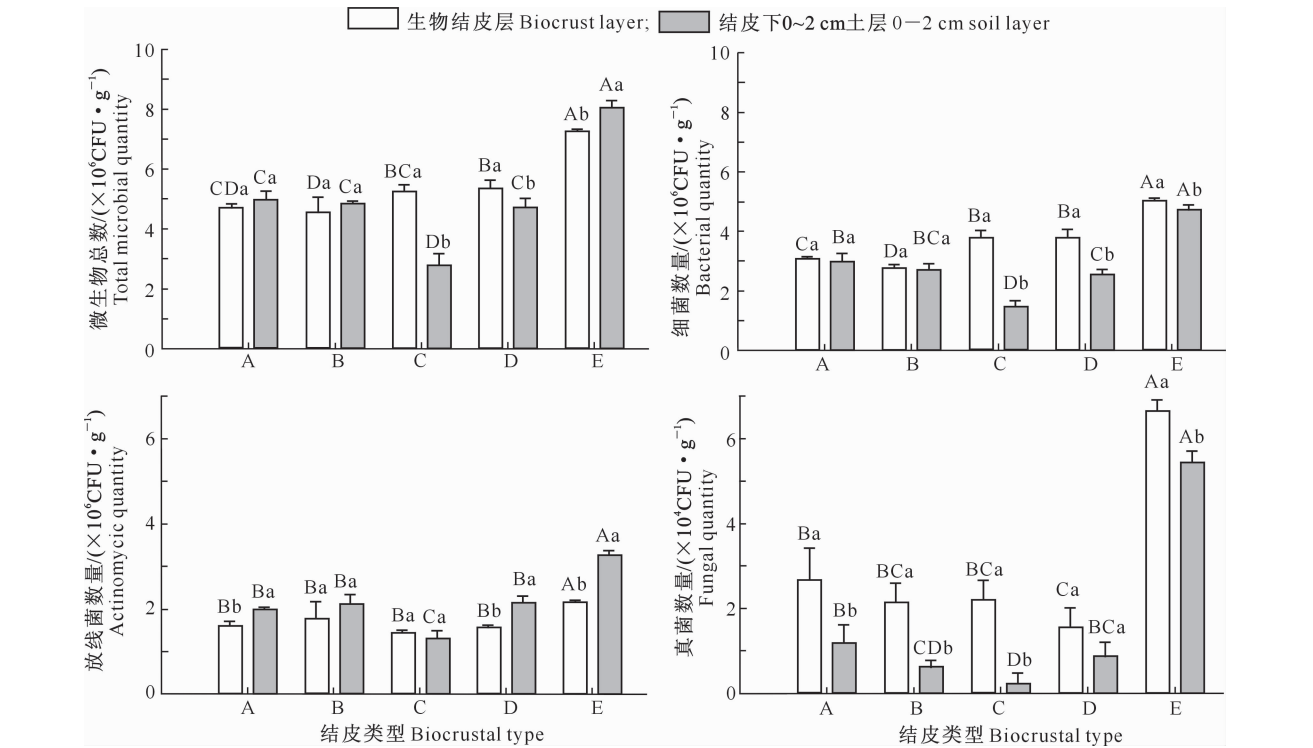
2.1 不同类型生物结皮的发育特征

表 2 是研究区不同类型生物结皮的发育特征。由表 2 可知,不同类型生物结皮厚度、藻盖度、藓盖度和地衣盖度差异较大。其中,结皮厚度和藓盖度大小依次为藓结皮>藓+少量藻结皮>藻+少量藓结皮>深色藻结皮>浅色藻结皮,而藻盖度则呈现相反趋势;此外,藓结皮和藓+少量藻结皮中还出现少量地衣。

他生物结皮,其中浅色藻结皮、深色藻结皮和藓+少量藻结皮三者间差异不显著,而藻+少量藓结皮则显著低于其他生物结皮。

2.2.2 可培养细菌数量 土壤细菌可以促进碳氮循环,增加土壤中有机质和氮含量。另外细菌还可以产生胞外代谢物以稳定团聚体。图 1 显示,研究区不同类型生物结皮可培养细菌数量表现出明显差异。在生物结皮层,不同类型生物结皮土壤中可培养细菌数量大小依次为藓结皮>混合结皮(藻+少量藓结皮和藓+少量藻结皮)>藻结皮(浅色藻结皮和深色藻结皮),藓结皮细菌数量较发育初期藻结皮增加了 0.77 倍,较混合结皮增加了 0.32 倍。在结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤细菌数量显著高于

其他生物结皮,表明生物结皮的形成增加了土壤细菌数量。在同一类型生物结皮中,生物结皮层的土壤细菌数量均高于结皮下 0~2 cm 土层,且藻+少量藓结皮表现尤为明显。



A. 浅色藻结皮;B. 深色藻结皮;C. 藻+少量藓结皮;D. 藓+少量藻结皮;E. 藓结皮。下图同。
图柱上标不同大写字母表示同一土层内不同类型生物结皮间差异显著($P<0.05, n=3$),
标不同小写字母表示同一类型结皮下不同土层间差异显著($P<0.05, n=3$)
A. Light cyanobacteria crust;B. Dark cyanobacteria crust;C. Cyanobacteria with sparse moss crust;D. Moss with tiny cyanobacteria patches crust;E. Moss crust. The same below. Different capital letters indicate significant difference in the same layer of different biocrust types ($P<0.05, n=3$),different lowercase letters indicate significant difference in the different soil layers under the same biocrust ($P<0.05, n=3$)

图 1 黄土丘陵区不同类型生物结皮中可培养微生物数量的变化
Fig. 1 Changes of cultivable microbial quantity under different biocrusts in Hilly Loess Plateau

2.2.3 可培养放线菌数量 放线菌能够分解有机质及多数细菌和真菌不能分解的有机化合物。图 1 显示,不同类型生物结皮土壤放线菌数量有所差异。在生物结皮层,藓结皮土壤放线菌数量显著大于其他 4 类生物结皮,且其余 4 类生物结皮间差异均不显著。在结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤放线菌数量也显著大于其他生物结皮。表明苔藓结皮的形成显著增加了土壤放线菌的数量。除了深色藻结皮和藻+少量藓结皮外,其他生物结皮下 0~2 cm 土层土壤放线菌数量均显著高于结皮层,且结皮下 0~2 cm 土层土壤放线菌数量的变化趋势与生物结皮层一致,表明生物结皮的形成抑制了放线菌的生长。

2.2.4 可培养真菌数量 真菌不仅可以分解有机物,还可以借助菌丝体将土壤细粒严实粘结,增加表土稳定性而避免水蚀。图 1 显示,在生物结皮层,藓结皮土壤真菌数量显著大于其他 4 类生物结皮,且

其余 4 类生物结皮间差异不明显。在结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤真菌数量也显著大于其他 4 类生物结皮。在同一类型生物结皮中,除藓+少量藻结皮外,生物结皮层的土壤真菌数量均显著高于其下层 0~2 cm 土层,且结皮下 0~2 cm 土层土壤真菌数量的变化趋势与生物结皮层一致;表明不同类型生物结皮的形成不仅显著增加了结皮层土壤真菌数量,并且也影响到了下层土壤真菌的生长繁殖。

2.2.5 土壤微生物类群组成 图 2 是不同类型生物结皮土壤微生物各类群的组成情况。由图 2 可见,生物结皮的形成不仅可以影响土壤微生物活性,而且也改变了土壤中各类群微生物所占比例。不同类型生物结皮中,土壤细菌占微生物总数的比例为 53.12%~72.09%,放线菌所占比例为 27.49%~46.80%,真菌最少仅有 0.08%~0.92%。藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮和藓结皮生物结皮层土

壤细菌所占比例均较浅色藻结皮和深色藻结皮有所增加,放线菌所占比例相应减少,真菌所占比例以藓结皮最高。不同类型生物结皮层中土壤细菌和真菌

所占比例均高于结皮下 0~2 cm 土层,相应地,放线菌所占比例低于结皮下 0~2 cm 土层。

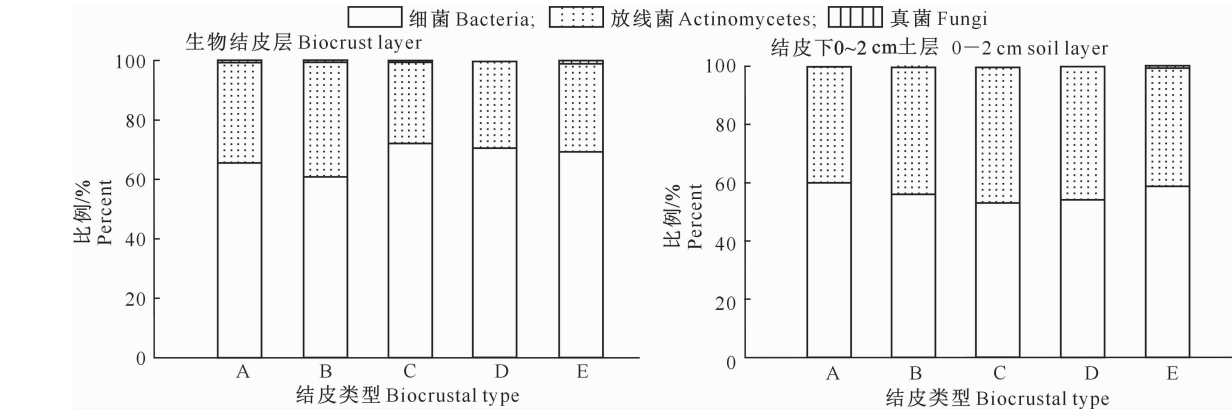


图 2 黄土丘陵区不同类型生物结皮的微生物类群组成

Fig. 2 Composition of soil microorganisms in different biocrusts in Hilly Loess Plateau

2.3 不同类型生物结皮土壤化学性质变化

表 3 是不同类型生物结皮土壤的化学性质。由表 3 可见,在生物结皮层,随着藓盖度的增大,土壤全氮和有机质含量从浅色藻结皮到藓结皮总体呈增加趋势;在结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤全氮和有机质含量均显著高于其他生物结皮。在生物结皮

层和结皮下 0~2 cm 土层,藓结皮土壤碳氮比均显著高于其他生物结皮。在同一类型生物结皮中,生物结皮层土壤全氮和有机质含量、碳氮比和电导率均显著高于结皮下 0~2 cm 土层,而生物结皮层土壤 pH 值则均显著低于结皮下 0~2 cm 土层(藓结皮除外)。

表 3 黄土丘陵区不同类型生物结皮的土壤化学性质

Table 3 Soil chemical properties in different biocrusts in Hilly Loess Plateau

土层 Soil layer	结皮类型 Biocrustal type	全氮/(g·kg ⁻¹) TN	有机质/(g·kg ⁻¹) OM	碳氮比 C/N ratio	pH	电导率/(mS·cm ⁻¹) EC
结皮层 Biocrust layer	A	0.77±0.09 Ca	15.60±2.02 Ea	11.77±0.60 Ba	7.60±0.02 Bb	184.77±5.25 Aa
	B	1.00±0.10 Ba	18.78±2.24 Da	10.85±0.32 Ca	7.64±0.03 ABb	186.02±5.75 Aa
	C	1.13±0.13 ABa	20.66±1.91 Ca	10.65±0.37 Ca	7.63±0.02 Bb	175.83±10.02 Ba
	D	1.23±0.09 ABa	24.68±1.55 Ba	11.68±0.71 Ba	7.63±0.04 ABb	181.10±13.65 ABa
	E	1.35±0.09 Aa	31.10±0.90 Aa	13.45±0.76 Aa	7.70±0.03 Aa	183.42±6.80 ABa
0~2 cm 土层 0-2 cm soil layer	A	0.47±0.04 Bb	8.01±1.06 Bb	9.80±0.47 Bb	7.97±0.04 Aa	131.02±4.20 Cb
	B	0.48±0.04 Bb	8.11±0.78 Bb	9.75±0.49 Bb	7.91±0.10 Aa	139.93±8.00 Bb
	C	0.40±0.02 Bb	6.53±0.25 Bb	9.47±0.18 Bb	7.94±0.07 Aa	130.75±5.12 Cb
	D	0.48±0.04 Bb	7.85±0.55 Bb	9.54±0.39 Bb	7.95±0.07 Aa	130.50±3.11 Cb
	E	0.82±0.11 Ab	14.84±2.17 Ab	10.46±0.41 Ab	7.72±0.06 Ba	156.73±2.90 Ab

注:同列数据后标不同大写字母表示同一土层内不同类型生物结皮间差异显著($P<0.05,n=3$),不同小写字母表示同一类型结皮下不同土层间差异显著($P<0.05,n=3$)。

Note: Different capital letters indicate significant difference in the same layer of different biocrustal types ($P<0.05,n=3$), and different lowercase letters indicate significant difference in the different soil layers under the same biocrust ($P<0.05,n=3$).

2.4 不同生物结皮发育特征与土壤微生物的相关性

不同类型生物结皮的生物组成和盖度不同,对土壤微生物的影响也不同。由表 4 可知,生物结皮中土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量与藓盖度、结皮厚度呈显著或极显著正相关关系,与藻盖度呈显著或极显著负相关关系;放线菌比例与藓盖度、结皮厚度呈显著负相关关系,与藻盖度呈显著正

相关关系。表明藓盖度增大可以促进细菌和真菌的生长繁殖,而藻盖度增大则会明显抑制细菌和真菌的生长繁殖。

2.5 不同生物结皮土壤化学性质与微生物的相关性

表 3 显示,生物结皮的形成和发育改变了生物结皮层和结皮下 0~2 cm 土层土壤的化学性质。当与微生物相关系数较高的土壤化学性质发生改变

时,必然会导致其数量的变化。由表 5 可知,不同类型生物结皮土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量和比例与全氮、有机质、碳氮比、电导率呈显著或极显著正相关关系,细菌和真菌数量与土壤 pH 值呈极显著或显著负相关关系;放线菌比例与全氮、有机质、碳氮比、电导率呈极显著负相关关系,与土壤 pH 值呈极显著正相关关系;放线菌数量与土壤化学性质均无显著相关关系。

表 4 黄土丘陵区不同生物结皮发育特征与土壤微生物的相关性分析

Table 4 Correlation coefficients among different biocrustal development characteristics and soil microorganisms in Hilly Loess Plateau

指标 Index	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
a	1									
b	−0.999**	1								
c	−0.962**	0.954**	1							
d	−0.849**	0.836**	0.872**	1						
e	−0.889**	0.880**	0.899**	0.966**	1					
f	−0.444	0.428	0.494	0.732**	0.531*	1				
g	−0.576*	0.558*	0.597*	0.835**	0.757**	0.723**	1			
h	−0.571*	0.576*	0.532*	0.376	0.602*	−0.354	0.124	1		
i	0.589*	−0.593*	−0.551*	−0.409	−0.631*	0.321	−0.175	−0.999**	1	
j	−0.349	0.332	0.362	0.629*	0.545*	0.603*	0.951**	−0.009	−0.044	1

注:a.藻盖度;b.藓盖度;c.结皮厚度;d.土壤微生物总数;e.细菌数量;f.放线菌数量;g.真菌数量;h.细菌比例;i.放线菌比例;j.真菌比例。* * 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关,* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关($n=15$)。
Note;a. Cyanobacteria coverage;b. Moss coverage;c. Crust thickness;d. Total microbial quantity;e. Bacterial quantity;f. Actinomycic quantity;g. Fungal quantity;h. Bacterial proportion;i. Actinomycic proportion;j. Fungal proportion. * * means significant difference between sites at $P<0.01$ level,* means significant difference between sites at $P<0.05$ level($n=15$).

表 5 黄土丘陵区不同生物结皮土壤化学性质与微生物的相关性

Table 5 Correlation coefficients among soil chemical properties and soil microorganisms in different biocrusts in Hilly Loess Plateau

指标 Index	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
a	1											
b	0.941**	1										
c	0.808**	0.561**	1									
d	0.862**	0.868**	0.591**	1								
e	0.284	0.583**	−0.321	0.358*	1							
f	−0.308	−0.604**	0.298	−0.389*	−0.999**	1						
g	0.748**	0.798**	0.430*	0.959**	0.459**	−0.490**	1					
h	0.363*	0.602**	−0.164	0.482**	0.825**	−0.831**	0.550**	1				
i	0.383*	0.622**	−0.152	0.538**	0.812**	−0.821**	0.599**	0.981**	1			
j	0.368*	0.574**	−0.107	0.588**	0.699**	−0.712**	0.655**	0.780**	0.875**	1		
k	−0.321	−0.499**	0.087	−0.442*	−0.710**	0.720**	−0.572**	−0.758**	−0.711**	−0.601**	1	
l	0.374*	0.557**	−0.059	0.521**	0.736**	−0.748**	0.655**	0.725**	0.708**	0.649**	−0.884**	1

注:a.土壤微生物总数;b.细菌数量;c.放线菌数量;d.真菌数量;e.细菌比例;f.放线菌比例;g.真菌比例;h.全氮;i.有机质;j.碳氮比;k.pH;l.电导率。* * 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关,* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关($n=30$)。
Note;a. Total microbial quantity;b. Bacterial quantity;c. Actinomycic quantity;d. Fungal quantity;e. Bacterial proportion;f. Actinomycic proportion;g. Fungal proportion;h. Total nitrogen;i. Organic matter;j. Carbon nitrogen ratio;k. pH;l. EC. * * means significant difference between sites at $P<0.01$ level,* means significant difference between sites at $P<0.05$ level ($n=30$).

3 讨 论

影响土壤微生物群落结构组成的土壤环境条件主要有水分、空气、有机质、矿物质和温度^[17]。不同类型生物结皮的生物体组成不同^[18-19],土壤微生物群落对环境变化极其敏感,因此生物结皮对表层土

壤水分、养分、通气状况等理化性质的改变也会影响土壤微生物的分布特征。

本研究中,不同类型生物结皮所处的气候、海拔、坡度和坡位基本一致,则不同类型生物结皮土壤微生物的数量差异主要与土壤性质的差异有关。生物结皮中的蓝藻、绿藻、地衣和藓类植物的光合作

用,以及蓝藻与蓝藻共生地衣的固氮作用,可以增加土壤生态系统中的有机质和氮含量^[20-22]。本研究结果表明,研究区生物结皮层土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量和土壤养分含量随生物结皮厚度和藓盖度的增加而增大,这与邵玉琴等^[11]和吉雪花等^[14]的研究结论相似,即土壤微生物数量随生物结皮厚度和藓密度的增加而增大。Zhang 等^[23]研究表明,随着生物结皮的发育,土壤微生物量、有机质和全氮含量均呈增加趋势。周智彬等^[24]和 Yu 等^[25]研究也表明,随着藓盖度增大对养分输入的贡献量增加,藓类植物表面营养体对水分的吸收作用和疏松的土壤结构为微生物活动提供了良好的营养、水分、通气条件。且藓类植物的残体可以为微生物生长提供丰富的碳源和氮源。高丽倩等^[26]指出,土壤抗蚀性随生物结皮中藓盖度的增加而增强,土壤环境更为稳定,养分流失量减少,为微生物的生长提供了有利条件。本研究中,研究区不同类型生物结皮中土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量和比例与全氮、有机质、碳氮比、电导率呈显著正相关关系,这与早期的相关研究结果^[7-8,12]较为一致。所以,生物结皮层中土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量的增加主要与其养分含量随藓盖度和结皮厚度的增大而增加有关。另外,杨永胜等^[6]认为,藓结皮的覆盖可以降低土壤温度的变幅,这种稳定的温度环境更利于微生物的生长。李林等^[27]研究表明,藓结皮可以增加水分在其表面滞留的时间,提高其表面水分的入渗量,增加表层土壤含水量,利于表层土壤微生物的生长。所以,本研究中,藓结皮土壤微生物数量显著高于其他生物结皮。

此外,本研究中,放线菌比例与藓盖度和结皮厚度呈显著负相关关系,主要原因可能是藓结皮较为丰富的养分条件促使细菌大量繁殖,而放线菌由于竞争能力较弱,所以生长被抑制。吉雪花等^[14]研究表明,土壤放线菌比例随细菌比例上升而下降。Albiach 等^[28]和 Griffiths 等^[29]研究也表明,肥力较好的土壤,微生物数量较多,其中细菌和真菌所占比例较高,而放线菌所占比例较低。

本研究中,生物结皮层中可培养土壤细菌数量和比例、真菌数量和比例均大于结皮下 0~2 cm 土层,这与前人研究结果^[10,24]一致。究其原因,首先,生物结皮不仅可减少阳光直射和水分散失,而且生物结皮表层疏松,可为细菌和真菌的生长繁殖提供较好的水、热、气条件^[6,24-25];其次,生物结皮层较高的有机质和全氮含量也为该层细菌和真菌的生长

提供了较好的养分条件。生物结皮层放线菌数量和比例均低于结皮下 0~2 cm 土层。这可能是由于:1)放线菌较耐干旱,受养分含量变化影响较小,发育缓慢,竞争能力弱^[30];2)生物结皮层细菌比例大且竞争力较强,从而抑制了放线菌的生长;3)放线菌喜碱,结皮层较低的土壤 pH 值可能抑制其生长。

黄土丘陵区水土流失严重,生物结皮的发育在促进这些区域的土壤养分循环和抗侵蚀方面具有重要作用,其对土壤理化属性的改善有利于土壤微生物的生长繁殖;这不仅可以改善土壤结构,而且在养分循环过程中可以发挥重要作用,微生物数量的增加可能加速生物结皮的发育,使二者形成一个良性循环。本研究结果表明,生物结皮对半干旱地区土壤微生物和土壤养分改善具有重要作用,因此应充分认识生物结皮保护和培育的重要性。

4 小 结

生物结皮的发育改变了土壤的化学和生物学性质,不同类型生物结皮的生物组分不同,对土壤化学和生物学性质的影响也不同。本试验通过对黄土丘陵区不同类型生物结皮土壤化学和生物学性质的研究,探讨了不同类型生物结皮对土壤微生物数量、组成分布的影响及机制,取得以下结果:

1)黄土丘陵区不同类型生物结皮可显著影响土壤微生物数量及比例。生物结皮层,不同类型生物结皮土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量随藓盖度和结皮厚度的增加而增大,放线菌比例随藓盖度和结皮厚度的增加而减小。结皮下 0~2 cm 土层中,藓结皮土壤微生物总数、细菌和放线菌数量、真菌数量和比例均显著高于其他生物结皮。生物结皮层土壤细菌数量和比例、真菌数量和比例均大于结皮下 0~2 cm 土层,但放线菌数量和比例均小于结皮下 0~2 cm 土层。

2)土壤微生物总数、细菌数量和比例、真菌数量和比例与全氮、有机质、碳氮比、电导率呈显著或极显著正相关关系,细菌数量和比例、真菌数量和比例与土壤 pH 值呈显著或极显著负相关关系。

3)随着藓盖度的增大,生物结皮通过增加土壤有机质和全氮含量、碳氮比、电导率,降低土壤 pH,从而促进土壤中细菌和真菌的生长繁殖,另一方面较高比例的细菌也抑制了放线菌的生长。

[参考文献]

[1] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: structure, function

- and management [M]. Berlin: Springer Press, 2003; 1, 29-40, 82-84.
- [2] Castillo-Monroy A P, Bowker M A, Maestre F T, et al. Relationship between biological soil crusts, bacterial diversity and population, and ecosystem functioning: insights from a semi-arid Mediterranean environment [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2011, 22(1): 165-174.
- [3] Maestre F T, Escudero A, Martine Z I, et al. Does spatial pattern matter to ecosystem functioning? Insights from biological soil crusts [J]. *Functional Ecology*, 2005, 19(4): 566-573.
- [4] 赵允格, 许明祥, 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.
- Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, et al. Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [5] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441-448.
- Zhao Y G, Xu M X, Wang Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in Hilly Loess Plateau, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441-448.
- [6] 杨永胜, 卜崇峰, 高国雄. 毛乌素沙地生物结皮对土壤温度的影响 [J]. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 352-359.
- Yang Y S, Bu C F, Gao G X. Effect of biological soil crust on soil temperature in the Mu Us sand land [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(1): 352-359.
- [7] 吴楠, 王红玲, 张静, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中微生物分布的时空差异 [J]. *科学通报*, 2006(ZD): 100-107.
- Wu N, Wang H L, Zhang J, et al. Difference of space-time distribution of soil microorganisms relating to biological crusts in the Gurbantunggut desert, Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006(ZD): 100-107.
- [8] 张威, 章高森, 刘光琇, 等. 腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征 [J]. *生态学报*, 2012, 32(2): 567-577.
- Zhang W, Zhang G S, Liu G X, et al. Characteristics of cultivable microbial community number and structure at the southeast edge of Tengger Desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 567-577.
- [9] 吴永胜, 哈斯, 李双权, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1624-1628.
- Wu Y S, Ha S, Li S Q, et al. Distribution patterns of microorganisms in biological crusts on sand dunes of southern Mu Us sandy land [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1624-1628.
- [10] 边丹丹, 廖超英, 孙长忠, 等. 黄土丘陵区土壤生物结皮对土壤微生物分布特征的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 109-114.
- Bian D D, Liao C Y, Sun C Z, et al. Effect of soil biological crust on the distribution of soil microorganisms in the loess hilly region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 109-114.
- [11] 邵玉琴, 赵吉. 不同固沙区结皮中微生物生物量和数量的比较研究 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 68-71.
- Shao Y Q, Zhao J. Comparative research on microbial biomass and number in soil microbiotic crust of different fixing sand dunes [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 68-71.
- [12] 尹瑞平, 王峰, 吴永胜, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物数量及其影响因素 [J]. *中国水土保持*, 2014(12): 40-44.
- Yin R P, Wang F, Wu Y S, et al. Microbial quantities of biological crusting of sand dunes in the southern edge of Mu Us Desert and its influencing factors [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014(12): 40-44.
- [13] 吴丽, 张高科, 陈晓国, 等. 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 [J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 1479-1485.
- Wu L, Zhang G K, Chen X G, et al. Development and succession of biological soil crusts and the changes of microbial biomasses [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4): 1479-1485.
- [14] 吉雪花, 吴楠, 张丙昌, 等. 苔藓密度对生物结皮土壤微生物的影响 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(4): 408-413.
- Ji X H, Wu N, Zhang B C, et al. Effect of moss density on soil microbes of biological soil crust [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2013, 31(4): 408-413.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34, 42-48, 163.
- Bao S D. Soil agro-chemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-34, 42-48, 163.
- [16] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 130-132, 139.
- Yao H Y, Huang C Y. Soil microbial ecology and its experimental technology [M]. Beijing: Science Press, 2006: 130-132, 139.
- [17] 陈华葵, 李卓棣, 陈文新, 等. 土壤微生物学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 20-31.
- Chen H K, Li F L, Chen W X, et al. Soil microbiology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981: 20-31.
- [18] Redfield E, Barns S M, Belnap J, et al. Comparative diversity and composition of cyanobacteria in three predominant soil crusts of the Colorado Plateau [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, 40: 55-63.
- [19] Yeager C M, Kornoshy J L, Housman D C, et al. Diazotrophic community structure and function in two successional stages of biological soil crusts from the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70: 973-983.
- [20] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from south-east Utah, USA [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128-135.
- [21] Chamizo S, Canton Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemis-*

- try, 2012, 49: 96-105.
- [22] 赵允格, 许明祥, Belnap J. 生物结皮光合作用对光温水的响应及其对生物结皮空间分布格局的解译: 以黄土丘陵区为例 [J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4668-4675.
- Zhao Y G, Xu M X, Belnap J. Response of biocrusts' photosynthesis to environmental factors: a possible explanation of the spatial distribution of biocrusts in the Hilly Less Plateau region of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4668-4675.
- [23] Zhang B C, Zhou X B, Zhang Y M. Responses of microbial activities and soil physical-chemical properties to the successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 101-109.
- [24] 周智彬, 李培军. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤中微生物的生态分布及其与土壤因子间的关系 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1246-1250.
- Zhou Z B, Li P J. Ecological distribution of soil microorganism in artificial greenbelt in hinterland of Taklimakan Desert and their relations with soil factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1246-1250.
- [25] Yu J, Kidron G J, Pen-Mouratov S, et al. Do development stages of biological soil crusts determine activity and functional diversity in a sand-dune ecosystem? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 66-72.
- [26] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- Gao L Q, Zhao Y G, Qin N Q, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau region of north-west China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 105-112.
- [27] 李林, 赵允格, 王一贺, 等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
- Li L, Zhao Y G, Wang Y H, et al. Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [28] Albiach R, Canet R, Pomanes F, et al. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil [J]. Bioresource Technology, 2000, 75: 43-48.
- [29] Griffiths B S, Ritz K, Ebbelwhite N, et al. Soil microbial community structure: effects of substrate loading rates [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 145-153.
- [30] 亚历山大. 土壤微生物学导论 [M]. 广西农学院农业微生物学教研组译. 北京: 科学出版社, 1983: 22-31.
- Alexander M. Introduction to soil microbiology [M]. Agricultural microbiology research group of Guangxi Agricultural College translated. Beijing: Science and Technology Press, 1983: 22-31.
- (上接第 104 页)
- [18] 韦斯·沃伦德, 唐·格兰姆斯. 美国国家灌溉工程手册 [M]. 水利部国际合作司, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- Voidrender W, Grimes D. US national irrigation engineering manual [M]. Department of International Cooperation Compiler, translate. Beijing: Water Resources and Hydropower Publishing House of China, 1998.
- [19] Clothier B, Green S. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water [J]. Agricultural Water Management, 1994, 25(1): 1-12.
- [20] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
- Wang S F, Zhang X Y, Pei D. Impact of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 27-32.
- [21] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60-67.
- Xie W Y, Fan G S, Zhou H P, et al. Effect of straw incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60-67.
- [22] 严昌荣, 居辉, 彭世琪, 等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 11-14.
- Yan C R, Ju H, Peng S Q, et al. Soil moisture dynamic characteristics of dryland field in northern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 11-14.
- [23] 逢蕾, 肖洪浪, 谢忠奎, 等. 砂田不同覆盖方式对土壤微生物组成的影响 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 351-358.
- Pang L, Xiao H L, Xie Z K, et al. Sunada influence of different cover on soil microbial composition [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 351-358.
- [24] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分运移的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 282-288.
- Song R Q, Zhu G X, Zhang R X, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation and salt distribution [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 282-288.
- [25] 张瑞喜, 褚贵新, 宋日权, 等. 不同覆砂厚度对土壤水盐运移影响的实验研究 [J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 849-853.
- Zhang R X, Zhu G X, Song R Q, et al. Experimental study of different thickness overlying sand salt and water movement influence [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 849-853.
- [26] Modaihsh A S. Soil water evaporation suppression by sand mulches [J]. Soil Science, 1985, 139(4): 357-361.