

DOI: 10.5846/stxb202106181624

王闪闪, 赵允格, 李彬彬, 郭玥微, 郭雅丽, 李雯, 乔羽. 混合生物结皮对土壤养分的影响与群落结构之关联——以黄土丘陵区的生物结皮为例. 生态学报, 2023, 43(3): 1247-1256.

Wang S S, Zhao Y G, Li B B, Guo Y W, Guo Y L, Li W, Qiao Y. Effects of mixed biocrusts on soil nutrients and their association with community structure: A case study from Hilly Loess Plateau region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1247-1256.

混合生物结皮对土壤养分的影响与群落结构之关联 ——以黄土丘陵区的生物结皮为例

王闪闪^{1,2}, 赵允格^{1,*}, 李彬彬^{1,2}, 郭玥微^{1,2}, 郭雅丽³, 李雯³, 乔羽³

1 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学资源环境学院, 杨陵 712100

摘要:自然条件下生物结皮是藻、藓及地衣等结皮类型以不同比例组成的混合群落, 显著影响土壤养分含量, 目前混合生物结皮对土壤养分的影响与其群落结构的关系尚不清楚, 限制了混合生物结皮土壤养分的评估。为此, 研究通过测定单一组成的藻结皮、藓结皮以及 80%藻+20%藓、60%藻+40%藓、40%藻+60%藓和 20%藻+80%藓 4 个不同藻藓比例的混合生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量, 研究了混合生物结皮土壤养分与其群落结构之间的关联。结果显示: (1) 藓结皮层土壤有机碳、全氮、速效磷、铵态氮和硝态氮含量显著高于藻结皮, 分别高出 166.4%、77.2%、55.1%、56.2% 和 42.2%。(2) 藻藓混合生物结皮土壤有机碳、全氮、速效磷和铵态氮含量与组成和盖度等结构特征有关, 可以通过单一类型生物结皮土壤养分含量与盖度加权预测混合生物结皮土壤养分储量。(3) 混合生物结皮土壤有机碳、全氮、速效磷和铵态氮储量实测值(x)与预测值(y)拟合的线性函数分别为 $y=0.97x$ 、 $y=0.96x$ 、 $y=1.18x$ 和 $y=0.92x$ 。(4) 混合生物结皮对全磷和硝态氮含量的影响与群落结构无关。生物结皮对下层 0—5 cm 土壤养分影响较小。研究揭示了混合生物结皮对土壤养分的影响与生物结皮群落结构之间的关联, 为准确评估自然条件下混合生物结皮对土壤养分的影响提供了科学依据。

关键词:生物结皮; 群落结构; 生态功能; 干旱生态系统; 黄土丘陵

Effects of mixed biocrusts on soil nutrients and their association with community structure: A case study from Hilly Loess Plateau region

WANG Shanshan^{1,2}, ZHAO Yunge^{1,*}, LI Binbin^{1,2}, GUO Yuewei^{1,2}, GUO Yali³, LI Wen³, QIAO Yu³

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Biological soil crusts (Biocrusts) are a mixed community which composed of cyanobacteria, moss and lichen in different proportions under natural condition. They significantly affect the soil nutrients. However, the relationship between the soil nutrients of mixed biocrusts and its community structure is unclear, which would hinder the assessment of soil nutrients of mixed biocrusts. Therefore, this study measured the soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of cyanobacteria, moss and mixed biocrusts with different proportions of cyanobacteria and moss, which were 80% Cyanobacteria + 20% Moss, 60% Cyanobacteria + 40%

基金项目:国家自然科学基金项目(41830758); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项

收稿日期:2021-06-18; **网络出版日期:**2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

Moss, 40% Cyanobacteria + 60% Moss, and 20% Cyanobacteria + 80% Moss in the Hilly Loess Plateau region. The results showed that (1) the soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of moss were significantly higher than those of cyanobacteria by 166.4%, 77.2%, 55.1%, 56.2% and 42.2%, respectively. (2) The contents of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and ammonium nitrogen in mixed biocrusts of cyanobacteria and moss were related to the composition and coverage. The nutrient storage of mixed biocrusts could be predicted by weighting the nutrient content and coverage of single type of biocrusts. (3) The linear functions fitted by the measured values (x) and predicted values (y) of soil organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and ammonium nitrogen storage in the mixed biocrusts were $y = 0.97x$, $y = 0.96x$, $y = 1.18x$ and $y = 0.92x$, respectively. (4) The effect of mixed biocrusts on soil total phosphorus and nitrate nitrogen contents was not significantly related to the community structure. The biocrusts had little effect on the soil nutrients in the soil layer 0—5 cm. This study reveals the relationship between soil nutrients of mixed biocrusts and community structure, which provides scientific basis for accurately evaluating the effect of mixed biocrusts on soil nutrients under natural conditions.

Key Words: biocrusts; community structure; ecological function; arid ecosystem; Hilly Loess

生物结皮是由隐花植物,如藻类、苔藓类、地衣类和土壤中的微生物以及其他相关生物体通过菌丝体、假根系和分泌物等与土壤表层的颗粒物胶结而形成的复杂群落,是构成干旱半干旱生态系统中的重要景观结构,具有重要的生态功能,如调节土壤水文过程、减少土壤侵蚀、增加土壤团聚体稳定性、改善土壤养分、提高维管植物幼苗的存活率等^[1]。在植被稀疏、干旱贫瘠的干旱半干旱生态系统,生物结皮对土壤培肥及保育具有重要意义^[2]。

目前,关于生物结皮对土壤养分的影响已有大量研究,证实生物结皮对土壤养分的影响与结皮类型(或组成)以及盖度等结构特征有关。如 Housman 等^[3]研究表明藓结皮的固碳率是藻结皮的 1.2 倍之多;吴楠等^[4]研究表明深色藻-地衣结皮固氮率是浅色藻结皮和藓结皮的 3—4 倍。张元明等^[5]在古尔班通古特沙漠的研究表明,地衣苔藓结皮土壤有机碳含量高于藻结皮土壤 28.6%。肖波等^[6]在黄土高原退耕地的研究表明,随着生物结皮的发育演替,生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷等养分含量呈指数函数增加。高丽倩等^[2]也证实,随着藓结皮生物量的增加,生物结皮土壤有机碳、全氮和全磷含量呈线性增长趋势。可见,生物结皮对土壤养分积累与其组成有关。以上研究主要明确了单一类型或特定组成的生物结皮(简称单一类型的生物结皮)对土壤养分的影响。然而,自然条件下,生物结皮多是由藻类、苔藓类和地衣类等生物以不同比例、不同方式组合的一个混合群落(混合生物结皮)^[7]。那么,单一类型生物结皮的土壤养分含量能否代表自然发育的混合生物结皮,二者之间有无关系?如何准确评估混合生物结皮对土壤养分的影响?以上问题尚不明确,妨碍了科学评估自然条件下生物结皮对土壤养分的贡献。

为此,本文以黄土丘陵区的生物结皮为对象,通过采集单一类型藻、藓结皮和不同藻藓盖度比例的混合生物结皮的土壤样品,通过室内分析,分析了单一类型和混合生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量,以及混合生物结皮与单一类型生物结皮土壤养分之间的关系,揭示了混合生物结皮土壤养分与群落结构之间的关系,为准确评估混合生物结皮生态功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北神木市六道沟小流域(110°21'—110°22'E, 38°46'—38°51'N)(图 1),总面积为 6.86 km²,流域海拔 1094.0—1273.9 m。该地区位于晋陕蒙三省接壤区,既属于黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡的过渡地带,又属于流水作用的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带,是黄土高原典型生态脆弱区^[8]。该区属中温带半干旱气候,盛行偏西和西北大风,年均气

温 8.4℃,多年平均降雨量 408.5 mm,降雨多集中在 6—9 月,年平均日照时数 2875.9 h,无霜期年平均为 199 d,多年年均水面蒸发量为 1336.6 mm。整个流域地面组成物质主要为第四纪黄土沉积物,并被分为东西两半,西部多为固定沙丘,以风沙土为主,占流域总面积的 13.5%;东部则大部分为黄土覆盖,占流域总面积的 86.5%^[9]。地貌类型为典型的盖沙黄土丘陵区。

该流域天然植被多已遭到严重破坏,现以人工植被和退耕荒坡地演替植被为主,主要为紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、无芒雀麦 (*Bromus inermis*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、茵陈蒿 (*Artemisia capillaries*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、草木樨状黄耆 (*Astragalus melilotoides*) 等^[10]。该流域生物结皮类型主要以藻结皮、藓结皮和藻藓混生结皮为主,平均盖度可达 70%—80%^[11],是该区退耕地表重要覆被物。

1.2 试验设计

选取流域内退耕 20 年的撂荒草地为研究样地,共 5 个,样地大小为 20 m×20 m,土壤类型均为黄绵土,样地间隔 100 m 以上。每个样地用 25 点样方法(25 cm×25 cm 样方)依样地形状按照“之”字状布设 10 个样方,调查生物结皮种类组成及盖度,记录样方中藻、藓、地衣、裸土、高等植物等出现频次,以各类物种在调查总点数中的百分数计算其相应的覆盖度。表 1 为研究样地概况。

表 1 研究样地概况

Table 1 Characteristics of the sampling sites

样地编号 Plot number	藻结皮盖度 Cyanobacterial coverage/%	藓结皮盖度 Moss coverage/%	植被盖度 Vegetation coverage/%	主要物种 Dominant species	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)
1	20.3±3.4	26.9±6.9	55.3±5.9	无芒雀麦、达乌里胡枝子	北	15
2	28.0±6.6	22.4±7.1	51.2±6.2	无芒雀麦、茵陈蒿、达乌里胡枝子	北	17
3	38.3±6.2	21.2±3.7	53.6±5.8	达乌里胡枝子、长芒草、草木樨状黄耆	南	20
4	32.9±4.7	12.5±5.2	58.2±3.2	长芒草、达乌里胡枝子	南	13
5	28.3±6.5	19.2±4.3	60.6±3.8	铁杆蒿、达乌里胡枝子	南	25

为了明确单一类型和混合生物结皮土壤养分之间的关系,研究于上述 5 个样地分别采取藻结皮、藓结皮,80%藻结皮+20%藓结皮、60%藻结皮+40%藓结皮、40%藻结皮+60%藓结皮、20%藻结皮+80%藓结皮 4 种不同藻藓盖度比例的混合生物结皮,共 6 个处理的结皮层、和结皮层下 0—2 cm 和 2—5 cm 土壤样品,分别测定其有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量。本文的目的在于比较单一类型生物结皮与混合生物结皮土壤养分之间的差异,故不设无结皮的对照组。图 2 是不同组成的生物结皮影像。

1.3 样品采集

于 2019 年 8 月 1 日至 10 日进行野外样品采集。在每个样地中,选择面积约为 5 cm×5 cm 的纯藻和纯藓结皮斑块采集单一类型生物结皮土壤样品,选择面积为 50 cm×50 cm 的 80%藻结皮+20%藓结皮、60%藻结皮+40%藓结皮、40%藻结皮+60%藓结皮、20%藻结皮+80%藓结皮 4 种不同藻藓盖度比例的混合生物结皮,每个混合生物结皮处理按照“S”型 5 点采集样品,保证采集的样品能够代表混合生物结皮的组成。样品采集按照生物结皮层、0—2 cm 和 2—5 cm 土壤样品,每样地单一类型和混合结皮各采集 5 处,采集完成后同一组成的样品充分混合,按 4 分法留取分析样品带回实验室风干,剔除肉眼可见的植物残渣以及藓类生物体及未分

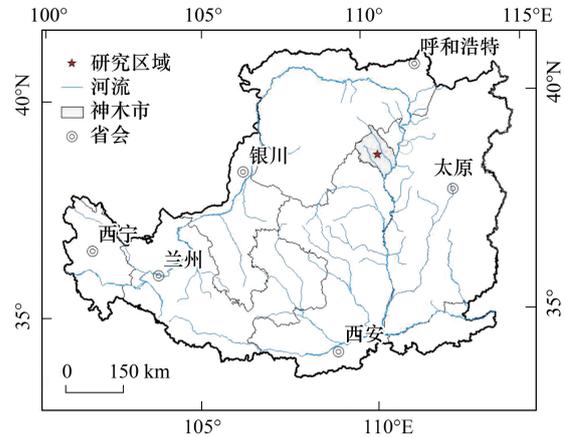


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

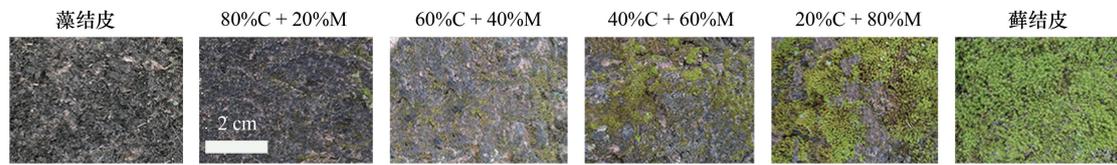


图 2 不同组成的生物结皮

Fig.2 Biocrusts of different composition

80% C+20% M: 80% 藻结皮+20% 藓结皮; 60% C+40% M: 60% 藻结皮+40% 藓结皮; 40% C+60% M: 40% 藻结皮+60% 藓结皮; 20% C+80% M: 20% 藻结皮+80% 藓结皮

解的植株体, 磨细过 1 mm 和 0.25 mm 筛用于测定土壤养分含量。同时用直径 9 cm 的培养皿在每个样地采集原状生物结皮样品, 风干遮光保存以测定生物结皮容重和结皮厚度。采样时, 选取高等植被间的空地, 避免植物根系的影响。表 2 为不同组成生物结皮属性。

表 2 不同组成生物结皮属性

Table 2 Properties of biocrusts of different composition

结皮盖度 Biocrustal coverage	结皮容重 Biocrust bulk density/(g/cm ³)	结皮厚度 Biocrust thickness/mm
藻结皮 Cyanobacteria	1.29±0.11a	3.62±0.11d
80% 藻结皮+20% 藓结皮 80% Cyanobacteria+20% Moss	1.25±0.12a	3.81±0.13d
60% 藻结皮+40% 藓结皮 60% Cyanobacteria+40% Moss	1.21±0.11ab	4.01±0.24c
40% 藻结皮+60% 藓结皮 40% Cyanobacteria+60% Moss	1.19±0.09ab	4.23±0.12c
20% 藻结皮+80% 藓结皮 20% Cyanobacteria+80% Moss	1.15±0.11b	5.65±0.44b
藓结皮 Moss	1.10±0.12b	6.16±0.35a

不同小写字母表示不同生物结皮组成间差异显著 ($P < 0.05$)

1.4 测定项目和方法

生物结皮覆盖度采用 25 点样方法^[7]; 植被盖度调查: 多人目估法^[12]。结皮层厚度: 采用游标卡尺测量; 结皮层容重: 涂膜法^[13]。有机碳: 重铬酸钾容量法-外加热法; 全氮: 半微量开氏法; 全磷: 高氯酸-硫酸法; 速效磷: 钼锑抗比色法^[14]; 铵态氮和硝态氮: AA3 全自动流动分析仪。

1.5 混合生物结皮与单一类型生物结皮土壤养分之关联

为了明确混合生物结皮与单一类型生物结皮土壤养分之间的关系, 参照草地生态系统有机碳储量的计算方法^[15], 即在一定面积内通过单一类型生物结皮土壤养分含量与盖度加权预测混合生物结皮土壤养分储量, 并与混合生物结皮实测的土壤养分储量进行比较。一定面积上单一类型生物结皮土壤养分储量的计算遵循以下公式计算:

$$N_c = N'_c \times C_c \times H \times \rho \quad (1)$$

$$N_m = N'_m \times C_m \times H \times \rho \quad (2)$$

式中, N_c 和 N_m 是一定面积上 (这里采用混合生物结皮的采样斑块面积 50 cm×50 cm) 藻结皮和藓结皮土壤养分储量; N'_c 和 N'_m 是藻结皮和藓结皮土壤养分含量; C_c 和 C_m 表示一定面积上藻结皮和藓结皮的盖度; H 是土层厚度 (均取 1 cm); ρ 结皮层容重。

$$N = N_c + N_m \quad (3)$$

式中, N 是指一定面积内藻藓混合生物结皮土壤养分储量, 样地中生物结皮类型主要为藻藓混合结皮, 地衣结皮盖度较低, 因此, 在该研究中未考虑地衣结皮对土壤养分的影响。

1.6 数据分析

运用 Kolmogorov-Smirnov test 检验数据的正态性, Levene's test 进行方差齐性检验。利用 SPSS 18.0 统计

分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),比较不同类型生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量的差异显著性以及不同藻藓盖度比例下混合生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量的差异显著性,采用相同的方法分析混合生物结皮养分储量实测值与预测值的差异显著性,并使用 LSD 法进行多重比较($\alpha=0.05$)。用 Pearson 相关性分析混合生物结皮土壤养分与藓藻盖度的关系,明确混合生物结皮与单一类型生物结皮土壤养分之间的关系。利用 Origin 2021 进行作图。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 单一类型生物结皮土壤养分含量

图 3 是藻、藓结皮的土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量。可见,藓结皮土壤有机碳、全氮、速效磷、铵态氮和硝态氮含量显著高于藻结皮。藓结皮层和下层 0—2 cm 土壤有机碳含量显著高于藻结皮 166.4%和 25.3%;藓结皮层和下层 0—2 cm 土壤全氮含量显著高于藻结皮 77.2%和 16.7%(图 3);2—5 cm 土层不同类型生物结皮土壤有机碳和全氮含量差异不显著。不同类型生物结皮不同层次土壤全磷含量差异不显著(图 3)。藓结皮层土壤速效磷、铵态氮和硝态氮含量分别显著高于藻结皮 55.1%、56.2%和 42.2%(图 3)。结皮层下 0—5 cm 土壤速效养分含量差异不显著。

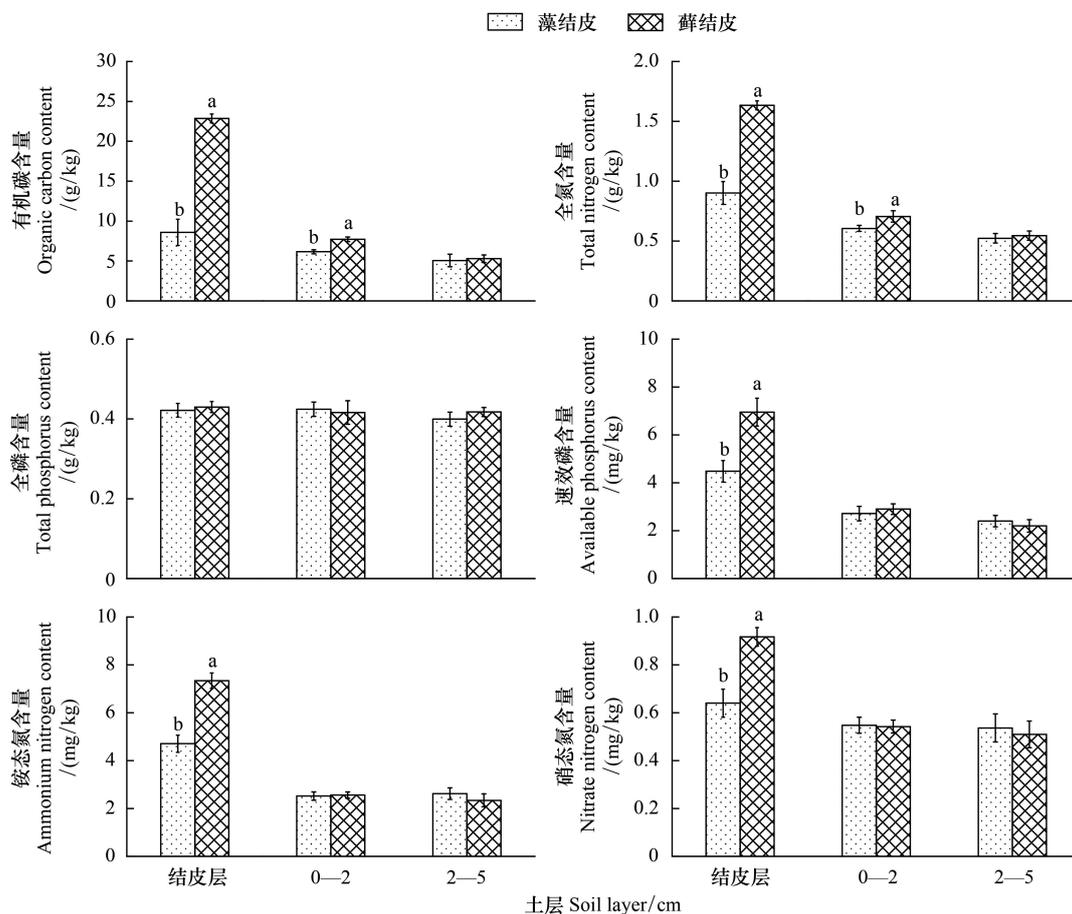


图 3 不同类型生物结皮土壤养分含量

Fig.3 Soil nutrient content of different biocrust types

不同小写字母表示同一土层不同类型生物结皮间差异显著($P<0.05$)

2.2 混合生物结皮土壤养分含量

图 4 是不同藻藓比例的混合生物结皮土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮含量。可见,混合生物结皮层的土壤有机碳和全氮含量随着藓结皮盖度的增加和藻结皮盖度的降低呈显著上升趋势。80%藻+20%藓、60%藻+40%藓、40%藻+60%藓、20%藻+80%藓的混合生物结皮土壤有机碳和全氮含量变化范围分别为 8.62—22.20 g/kg 和 0.89—1.58 g/kg,20%藻+80%藓混合生物结皮土壤有机碳和全氮含量分别显著高于 80%藻+20%藓混合生物结皮 157.5% 和 77.5% (图 4)。土壤全磷含量随藓结皮盖度的增加无显著变化 (图 4)。20%藻+80%藓混合生物结皮层下 0—2 cm 土壤有机碳和全氮含量显著高于 80%藻+20%藓混合生物结皮层下 29.8% 和 18.3% (图 4)。不同藻藓比例的混合生物结皮层下 2—5 cm 土层土壤有机碳、全氮和全磷含量差异不显著。

在结皮层,80%藻+20%藓、60%藻+40%藓、40%藻+60%藓、20%藻+80%藓的混合生物结皮土壤速效磷、铵态氮和硝态氮含量变化范围分别为 3.87—5.91 mg/kg、5.61—6.94 mg/kg 和 0.59—0.71 mg/kg。20%藻+80%藓混合生物结皮土壤速效磷、铵态氮和硝态氮含量分别显著高于 80%藻+20%藓混合生物结皮 52.7%、23.7% 和 20.3% (图 4)。不同藻藓比例下混合生物结皮对下层 0—5 cm 土壤速效养分含量影响不显著。

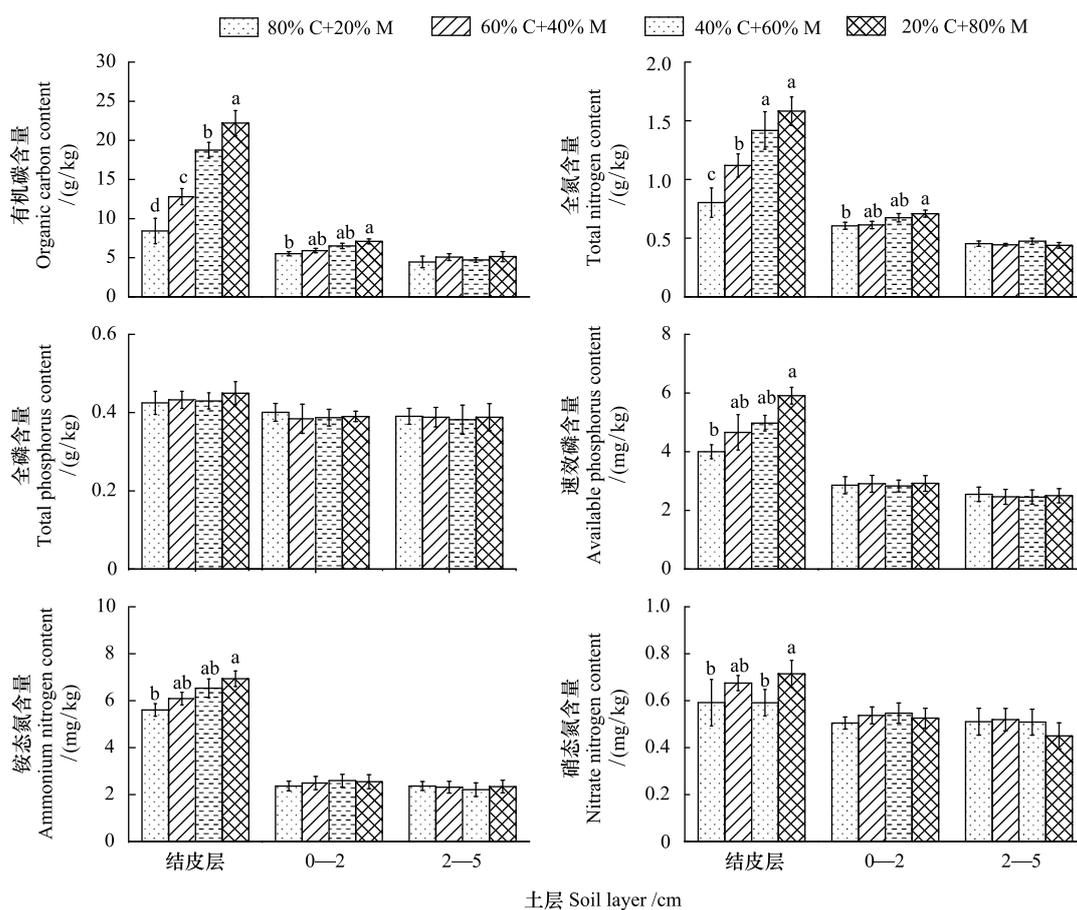


图 4 混合生物结皮土壤养分含量

Fig.4 Soil nutrient content of mixed biocrusts

不同小写字母表示同一土层不同藻藓比例的混合生物结皮间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 混合与单一类型生物结皮土壤养分之关联

从图 5 可以看出,混合生物结皮土壤有机碳、全氮、速效磷和铵态氮含量随藓藻盖度比值(藓结皮盖度与藻结皮盖度比值)的增加呈对数曲线增加。藓藻盖度比与土壤有机碳含量 ($r = 0.819, P < 0.01$) 和全氮含量

($r=0.833, P<0.01$) 呈极显著相关, 与土壤速效磷含量($r=0.630, P<0.05$) 和铵态氮含量($r=0.601, P<0.05$) 呈显著相关, 与土壤全磷和硝态氮含量无显著相关性(图 5)。

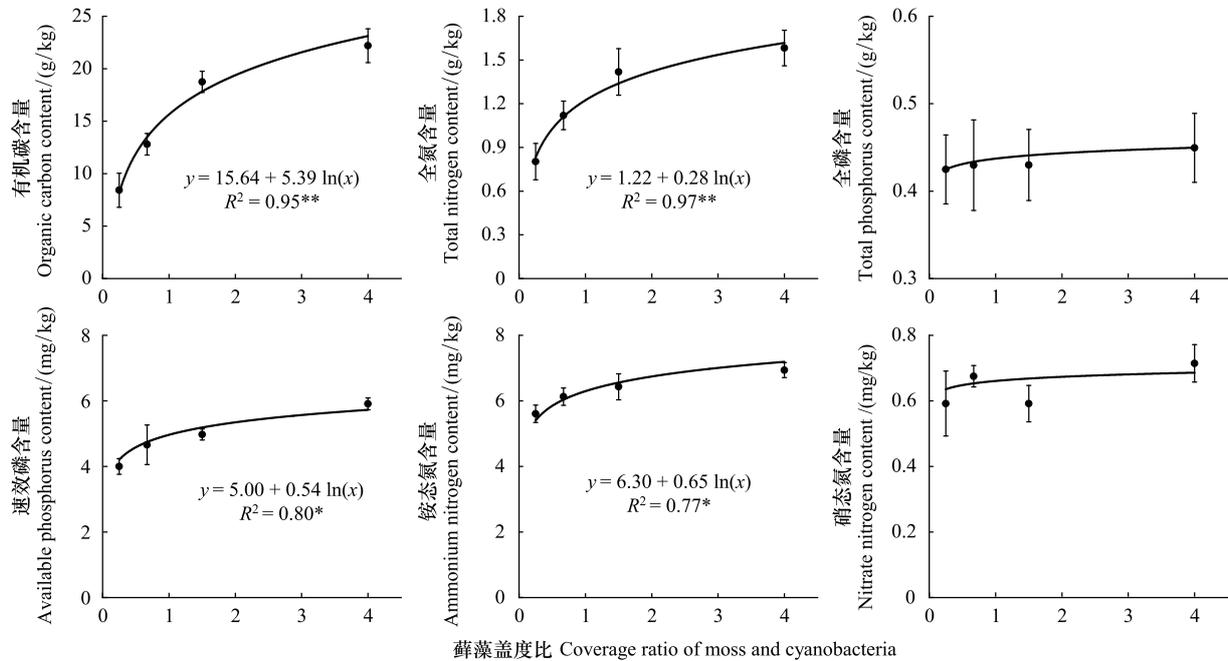


图 5 混合生物结皮土壤养分含量与藓藻盖度比的关系

Fig.5 The relationship between soil nutrient contents of mixed biocrusts and coverage ratio of moss and cyanobacterial coverage

* 和 ** 表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著性差异

从图 6 可知,混合生物结皮土壤有机碳和全氮储量实测值与预测值差异不显著。80%藻+20%藓、60%藻+40%藓和 40%藻+60%藓混合生物结皮土壤速效磷储量实测值与预测值差异显著,80%藻+20%藓和 40%藻+60%藓混合生物结皮土壤铵态氮储量实测值与预测值差异显著(图 6)。

混合生物结皮土壤有机碳储量实测值(x)与预测值(y)拟合的线性函数为 $y=0.97x$ ($R^2=0.99, P<0.01$), 混合生物结皮土壤全氮储量实测值(x)与预测值(y)拟合的线性函数为 $y=0.96x$ ($R^2=0.98, P<0.01$) (图 7)。混合生物结皮土壤有机碳和全氮储量实测值与预测值拟合的线性函数的斜率接近 1。混合生物结皮土壤速效磷储量实测值(x)与预测值(y)拟合的线性函数为 $y=1.18x$ ($R^2=0.78, P<0.01$), 混合生物结皮土壤铵态氮储量实测值(x)与预测值(y)拟合的线性函数为 $y=0.92x$ ($R^2=0.88, P<0.01$) (图 7)。混合生物结皮土壤速效磷和铵态氮储量实测值与预测值拟合的线性函数与 1:1 线的偏差较大,线性关系 R^2 较小,预测的准确性低于土壤有机碳和全氮。

3 讨论

3.1 研究区不同类型和混合生物结皮土壤养分含量

生物结皮是干旱半干旱地区广泛存在的地被物,显著增加土壤养分含量。不同类型生物结皮对土壤养分的富集程度不同^[16]。本研究表明,藓结皮土壤有机碳、全氮、速效磷、铵态氮和硝态氮含量显著高于藻结皮(图 3)。虽然藓结皮和藻结皮均具有固碳作用,但藓结皮的光合及呼吸作用速率显著高于藻结皮,因此对碳的输入量显著高于藻结皮^[17]。而生物结皮中藻结皮具有固氮作用,藓结皮本身不具有固氮作用,其固氮作用主要靠寄生在其附生的固氮藻类完成^[18],但由于前期藻结皮对氮素的累积,藓结皮更易捕获大气粉尘和拦截凋落物以及藓结皮固碳的同时也会增加氮素的累积,从而使得藓结皮的碳、氮含量均高于藻结皮^[19]。不同类型生物结皮盖度能直接反映各结皮类型同化面积的大小,藻结皮和藓结皮均能够有效的增加资源的吸收和利

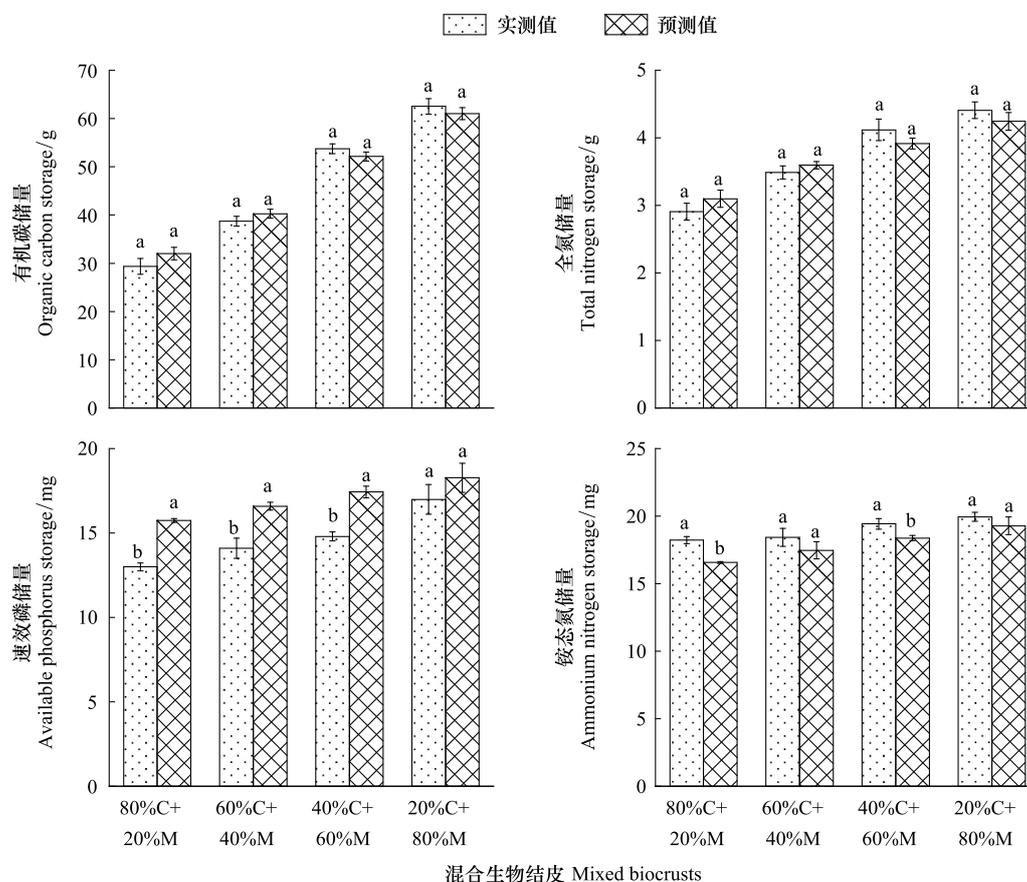


图 6 混合生物结皮土壤养分实测值与预测值比较

Fig.6 Comparison between measured value and predicted value of soil nutrient storage of mixed biocrusts

不同小写字母表示实测值与预测值差异显著 ($P < 0.05$)

用,同时对于同一面积大小的混合生物结皮,藓结皮盖度的增加意味着藓生物量增加,高丽倩等^[2]研究表明,随着藓结皮生物量的增加,生物结皮土壤有机碳和全氮呈逐渐增加趋势,与本研究结果相符。随着藓盖度的增加,土壤全磷变化不明显。有研究表明,生物结皮的发育演替对土壤全磷的影响有限^[1,20],这可能与土壤磷含量主要与土壤母质有关^[20]。生物结皮对下层土壤养分的影响有限,在0—2 cm 土层,藓结皮土壤有机碳和全氮含量显著高于藻结皮,与已有的研究结果一致^[21]。

土壤速效磷、铵态氮和硝态氮含量并未随藓结皮盖度增加而依次显著增加,仅在20%藻+80%藓混合生物结皮显著高于80%藻+20%藓的混合生物结皮。生物结皮通过提高结皮层土壤碱性磷酸酶活性和有机质,并降低结皮层土壤 pH,进而提高土壤速效磷含量^[22]。生物结皮对土壤铵态氮和硝态氮含量的增加主要从以下两个方面:(1)生物结皮固定的氮以铵态氮的形式释放到土壤中,然后迅速转化为硝态氮^[18];(2)占土壤全氮量95%以上的有机氮经过微生物的矿化作用,转化为铵态氮和硝态氮^[23]。在氮素转化过程中,除受土壤全氮含量影响外,还与土壤水分、温度、pH 以及微生物活性等有关^[24]。

3.2 混合与单一类型生物结皮土壤养分之关联

自然条件下,生物结皮是由多类型组成的复杂复合体,不同类型的生物结皮通过其自身独特的生物学特性影响土壤养分的来源及代谢过程,进而影响土壤养分含量^[25]。生物结皮对土壤养分贡献功能不仅与群落结构有关,还与养分类型有关。混合生物结皮土壤有机碳和全氮含量与群落结构密切相关,可以通过单一类型生物结皮土壤有机碳和全氮含量与盖度加权预测,该预测值与实测值无显著差异,二者拟合的线性函数的斜率接近1 ($R^2 \geq 0.98, P < 0.01$) (图7)。土壤全磷和硝态氮与生物结皮群落结构关系不密切,则需在样地内

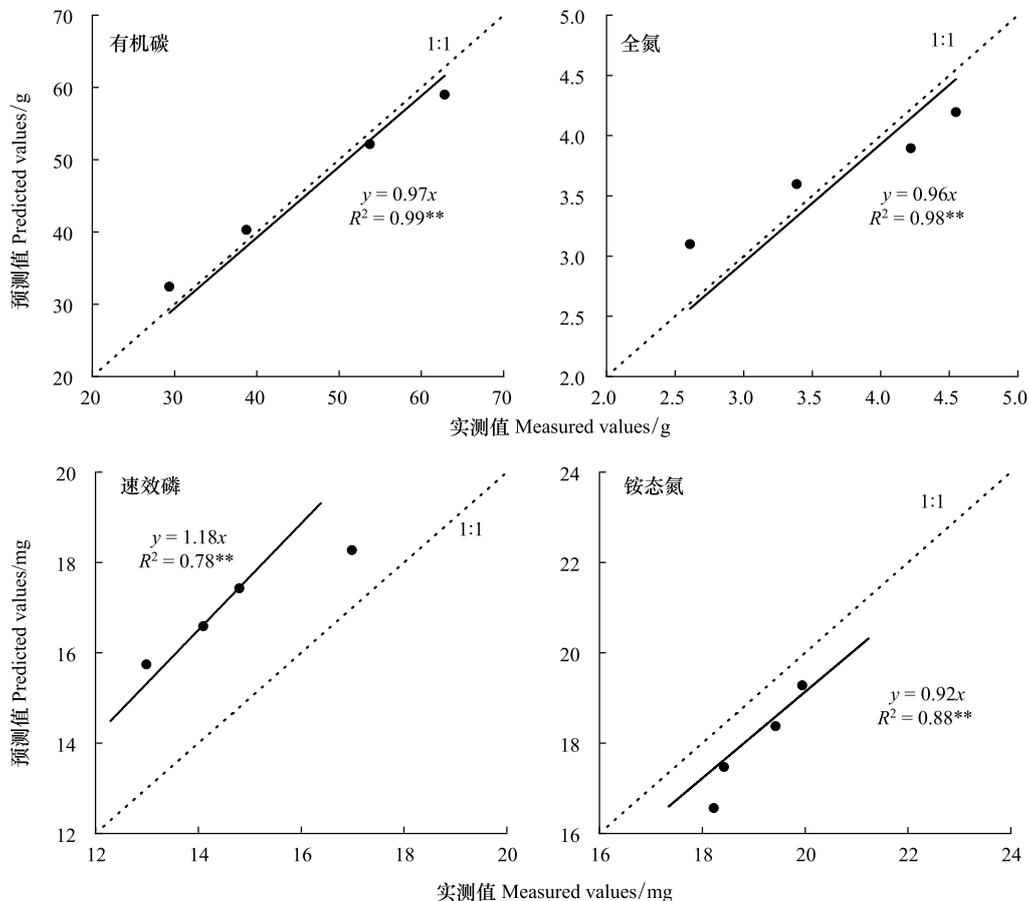


图 7 混合生物结皮土壤养分储量实测值与预测值的线性拟合

Fig.7 Linear fitting of measured values and predicted values of soil nutrients storage of mixed biocrusts

多点采集测定。虽然速效磷和铵态氮与生物结皮群落结构有关,但受外界环境因素的影响,弱化了二者之间的关系,预测混合生物结皮土壤速效磷和铵态氮储量的准确性低于有机碳和全氮,在样地内选择能够代表混合生物结皮群落结构特征的表现面积内采样测定分析准确性更高^[26]。

本结果中没有考虑地衣结皮,虽然地衣结皮也具有增加土壤养分的功能^[19],但在黄土高原地区地衣结皮盖度不足 10%^[27],因此,通常忽略地衣结皮对该区土壤养分的贡献。但在估算不同区域或者全球尺度上混合生物结皮土壤养分累积量时,需将生物结皮中不同物种对土壤养分累积量均考虑在内^[28]。生物结皮物种组成和盖度的变化可作为判断干旱半干旱地区土壤养分变化的一个重要指标,通过物种组成和盖度的调查间接了解和预测土壤养分变化状况。

生物结皮作为一种微小生态系统,具有简单、低成本、兼容性和可操作性等特点,部分研究者认为生物结皮可作为模式生态系统的代表,用以研究部分复杂的生态学问题^[29]。本研究以生物结皮为模式生态系统,证实了生物结皮群落结构与土壤养分之间的关系,即混合生物结皮土壤有机碳和全氮含量与单一类型生物结皮的土壤养分含量和盖度密切相关,结果对预测坡面尺度或更大尺度上混合生物结皮对土壤养分的累积具有重要的指导意义。生物结皮对水土保持功能的影响也与其群落结构有关^[30-31],然二者之间的关系有待进一步深入研究。明确单一类型生物结皮与混合生物结皮生态功能之间的关系,为进一步明确自然条件下混合生物结皮生态功能提供理论依据。

4 结论

(1) 混合生物结皮对土壤养分含量的影响不仅与群落结构有关,还与养分类型有关。混合生物结皮土壤

有机碳和全氮含量与群落结构极显著相关;混合生物结皮土壤速效磷和铵态氮含量与群落结构显著相关;混合生物结皮土壤全磷和硝态氮含量与群落结构无显著关联。

(2)混合生物结皮土壤有机碳和全氮含量可以用不同类型生物结皮土壤有机碳和全氮含量与其盖度进行加权预测,预测值与实测值二者拟合的线性关系的斜率接近 1。

(3)生物结皮组成和盖度等结构特征可作为判断干旱半干旱地区土壤有机碳和全氮含量变化的一个重要指标,通过调查物种组成和盖度间接预测混合生物结皮土壤养分变化状况。

参考文献(References):

- [1] Eldridge D J, Greene R. Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Soil Research*, 1994, 32(3): 389.
- [2] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 孙会, 杨巧云. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响. *生态学报*, 2018, 38(2): 678-688.
- [3] Housman D C, Powers H H, Collins A D, Belnap J. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(4): 620-634.
- [4] 吴楠, 张元明, 王红玲, 张静, 陈荣毅, 聂华丽. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性. *生态学报*, 2007, 27(9): 3785-3793.
- [5] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 张道远. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征. *生态学报*, 2005, 25(12): 3420-3425.
- [6] 肖波, 赵允格, 许明祥, 邵明安. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1019-1026.
- [7] Belnap J, Rosentreter R, Leonard S, Kaltenecker J H, Eldridge D J. *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. United States Department of the Interior Bureau of Land Management Printed Materials Distribution Center (Denver, Colorado), 2001: 1-7.
- [8] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究. *自然资源学报*, 2000, 15(1): 97-100.
- [9] 李胜龙, 肖波, 孙福海. 黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 111-119.
- [10] 李林, 赵允格, 王一贺, 王媛. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [11] 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. *生态学报*, 2007, 27(11): 4662-4670.
- [12] 王闪闪, 赵允格, 石亚芳, 高丽倩, 杨巧云. 短期放牧干扰对黄土丘陵区生物结皮土壤氮素累积的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3848-3854.
- [13] 范文波, 李小娟. 涂膜法测定黄土结皮容重. *山西水土保持科技*, 2001(3): 9-10.
- [14] 鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [16] Elbert W, Weber B, Burrows S, Steinkamp J, Büdel B, Andreae M O, Pöschl U. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 459-462
- [17] 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——以黄土丘陵区为例. *生态学报*, 2010, 30(17): 4668-4675.
- [18] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128-135.
- [19] 杨巧云, 赵允格, 包天莉, 丁倩, 刘广亮. 黄土丘陵区不同类型生物结皮下的土壤生态化学计量特征. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2699-2706.
- [20] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [21] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441-448.
- [22] 张国秀, 赵允格, 许明祥, 高丽倩. 黄土丘陵区生物结皮对土壤磷素有效性及碱性磷酸酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 621-628.
- [23] 黄昌勇. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 任成杰, 韩新辉, 佟小刚, 冯永忠. 黄土丘陵区退耕地土壤可溶性氮组分季节变化与水热关系. *生态学报*, 2018, 38(2): 689-697.
- [25] Belnap J, Büdel B, Lange O L. *Biological soil crusts: characteristics and distribution*. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001: 3-30.
- [26] Wang S S, Liu B Y, Zhao Y G, Gao L Q, Yin B, Yang K, Ji J Y. Determination of the representative elementary area (REA) of biocrusts: A case study from the Hilly Loess Plateau region, China. *Geoderma*, 2021, 406: 115502
- [27] 王一贺, 赵允格, 李林, 高丽倩, 胡忠旭. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局. *生态学报*, 2016, 36(2): 377-386.
- [28] Sancho L G, Belnap J, Colesie C, Raggio J, Weber B. Carbon Budgets of Biological Soil Crusts at Micro-, Meso-, and Global Scales *Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands*, 2016: 287-304.
- [29] Bowker M A, Maestre F T, Eldridge D, Belnap J, Castillo-Monroy A, Escolar C, Soliveres S. Biological soil crusts (biocrusts) as a model system in community, landscape and ecosystem ecology. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(7): 1619-1637.
- [30] Gao L Q, Bowker M A, Xu M X, Sun H, Tuo D F, Zhao Y G. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 49-58.
- [31] 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异. *生态学报*, 2004, 24(2): 330-337.