

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.019; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.019.

安乐, 何静, 刘艳梅, 等. 荒漠灌丛对生物土壤结皮下土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 83-90.

An Le, He Jing, Liu Yanmei, et al. Effects of desert shrubs on soil nutrients under biocrusts[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 83-90.

## 荒漠灌丛对生物土壤结皮下土壤养分的影响

安乐<sup>1,2</sup>, 何静<sup>1</sup>, 刘艳梅<sup>3,4</sup>, 索凯<sup>3</sup>, 赵紫娟<sup>3</sup>, 王凯亮<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730000; 2. 甘肃林业职业技术大学, 甘肃 天水 741020;

3. 天水师范学院, 甘肃 天水 741000; 4. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 揭示荒漠灌丛对生物土壤结皮下土壤养分的影响, 为干旱沙区荒漠生态系统的修复与管理提供理论基础和科学依据。 [方法] 采集腾格里沙漠东南缘红卫天然植被区的无灌丛生物土壤结皮(对照地)和白滨藜、柠条、狭叶锦鸡儿、油蒿 4 种典型灌丛+生物土壤结皮下 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—30 cm 土样, 分别测定土壤有机质(SOM)、含水量(SWC)、pH 值、全氮(TN)、速效氮(AN)、全磷(TP)、速效磷(AP)、全钾(TK)、速效钾(AK)的含量, 通过土壤养分变化表征灌丛与生物土壤结皮互作对荒漠区土壤质量的影响。 [结果] (1) 相较于对照地, 灌丛与生物土壤结皮互作影响土壤养分, 提高土壤 TN, TK, AK, AN, SOM, AP 和藻-地衣结皮 TP 含量, 降低藓类结皮 TP 含量。(2) 土层深度变化、灌丛和结皮类型对土壤养分有显著影响, 每二者交互都对 TP 影响不显著, 三者间交互除 AN 和 AP 外, 对其余养分指标都有显著影响( $p < 0.05$ )。(3) 同土层灌丛+藓类结皮下土壤 TN, TP, AK, SOM 的含量高于灌丛+藻-地衣结皮。(4) 4 种灌丛+生物土壤结皮下土壤养分富集于 0—10 cm 土层, 表聚效应明显, 灌丛、生物土壤结皮和土层深度三者间互作对土壤养分的富集能力有差异性。 [结论] 灌丛与生物土壤结皮互作能增加土壤肥力, 改良土壤质量, 对维持稳定的荒漠生态系统有重要作用。

**关键词:** 荒漠; 灌丛; 生物土壤结皮; 土壤养分

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0083-08

## Effects of desert shrubs on soil nutrients under biocrusts

An Le<sup>1,2</sup>, He Jing<sup>1</sup>, Liu Yanmei<sup>3,4</sup>, Suo Kai<sup>3</sup>, Zhao Zijuan<sup>3</sup>, Wang Kailiang<sup>3</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Forestry Voctech University, Tianshui, Gansu 741020, China; 3. Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China; 4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The purposes of this study are to reveal the effect of desert shrubs on soil nutrients under biocrusts, and to provide theoretical basis and scientific basis for the restoration and management of desert ecosystem in arid sandy area. [Methods] Soil samples were collected from 0—10 cm, 10—20 cm and 20—30 cm soil layers under non-shrubs biocrusts (control) and biocrusts of four typical shrubs (*Atriplex canescens*, *Caragana korshinskii*, *Caragana stenophylla* and *Artemisia ordosica*) in Hongwei natural vegetation sand-fixing area in the southeastern margin of Tengger Desert. The contents of soil organic matter (SOM), water content (SWC), pH value, total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), total potassium (TK) and available potassium (AK) were measured respectively. The effect of interaction between shrubs and biocrusts on soil quality in desert area were characterized by soil nutrient change. [Results] (1) Compared with the control plot, the interaction between shrubs and biocrusts affected soil nutrients, increased soil TN, TK, AK, AN, SOM, AP and cyanobacteria-

收稿日期: 2024-05-18

修回日期: 2024-06-14

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 甘肃省自然科学基金(21JR7RE177); 甘肃省科技计划项目(23JRZE511)

第一作者: 安乐(1979—), 女, 甘肃秦安人, 硕士, 教授, 主要从事林业生态研究。E-mail: 807984349@qq.com

通信作者: 何静(1979—), 女(满族), 辽宁本溪人, 博士, 教授, 主要从事经济林病害生物防治研究。E-mail: 864798021@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

lichen crust TP content, and reduced moss crust TP content. (2) Soil depth change, shrubs and biocrusts type had significant effects on soil nutrients, and the interaction between each two had no significant effect on TP. Except for AN and AP, the interaction between the three had significant effects on other nutrient indexes ( $p < 0.05$ ). (3) In the same soil layer, the contents of SOM, TN, TP and AK in the soil under the shrubs + moss crust were higher than those under the shrubs + cyanobacteria-lichen crust. (4) The soil nutrients under the four shrubs + biocrusts were enriched in the 0—10 cm soil layer, and the surface accumulation effect was obvious. The interaction between shrubs, biocrusts and soil depth had different enrichment ability for soil nutrients. [Conclusion] The interaction between shrubs and biocrusts can increase soil fertility, improve soil quality, and play an important role in maintaining a stable desert ecosystem.

**Keywords:** desert; shrubs; biocrusts; soil nutrient

生物土壤结皮是由苔藓、藻类、地衣等隐花植物,土壤微生物等个体微小的生物成分与土壤颗粒胶结形成的,兼具生物和土壤特性的复杂有机复合体<sup>[1-2]</sup>,是荒漠区的主要生物成分,生物土壤结皮的覆盖度甚至可高达 75% 以上<sup>[3-4]</sup>。生物土壤结皮能够为维管束植物的生长和定居提供有利的生存条件<sup>[5-6]</sup>,具有较强的抗风蚀、水蚀<sup>[7]</sup>,改良土壤,减少土壤水分流失<sup>[8]</sup>,驱动养分循环和水文过程等功能<sup>[9]</sup>,在干旱半干旱地区生态修复过程中发挥重要作用<sup>[10]</sup>,是荒漠区的生态系统工程师<sup>[11]</sup>。

耐旱灌丛能适应极端干旱环境条件,具有改善土壤水肥的能力和降风滞尘<sup>[12]</sup>、改善灌丛下地表微环境<sup>[13]</sup>与小气候的功能,对于维持干旱半干旱生态系统的安全、促进沙地结皮形成和加快生态恢复过程中起着重要作用<sup>[14]</sup>。已有研究表明,生物土壤结皮能够提高土壤的养分<sup>[15-16]</sup>;柠条和油蒿灌丛均存在“肥岛”现象对土壤养分具有明显的富集作用<sup>[17]</sup>,狭叶锦鸡儿灌丛内的养分含量均高于灌丛外相同土层<sup>[18]</sup>。尽管许多学者对生物土壤结皮或上述 3 种灌丛对土壤养分的影响做了大量的研究,但关于白滨藜灌丛对土壤养分有何影响及灌丛与生物土壤结皮互作对土壤养分影响如何,相关研究鲜见报道。因此,本文通过探索腾格里沙漠天然植被区 4 种典型耐旱灌丛 + 生物土壤结皮下土壤养分情况,明确灌丛与生物土壤结皮是否互作影响土壤养分,为旱区土壤养分演变动态提供科学依据,同时为本区域灌木的生长控制与利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘的天然植被区(37°32'N, 105°02'E),属草原化荒漠地带,气候干燥,年均气温 10.0℃,最低气温 -25.1℃,最高气温 38.1℃,全年日照时数 3 264 h,多年均降水量为 186 mm,集

中在 5—9 月,降水是该地区植物生长的主要水分来源<sup>[19]</sup>,年蒸发量高达 3 000 mm。该区大气降水经蒸发、蒸腾之后,有剩余的水分向下入渗,并成为地下水的补给来源<sup>[20]</sup>。土壤为碱性沙地,透气性好,pH 值在 8.0~8.5,土壤含水率在 0.99%~4.83%,生物土壤结皮盖度达 60% 以上<sup>[21]</sup>。在该区域存在两种生境,分别为灌木 + 生物结皮覆盖以及单独生物结皮覆盖,维管束植物群落由优势种群——白滨藜(*Atriplex cana* C. A. Mey.),亚优势种——狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla* Pojark.)、油蒿(*Artemisia ordoseca* Krasch.)和柠条(*Caragana korshinskii* Kom.),偶见种——沙冬青 [*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng] 和花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch.)组成。

### 1.2 样品的采集与处理

选取腾格里沙漠东南缘红卫天然植被区灌丛 + 生物土壤结皮覆盖下的沙质土壤为研究对象,以无灌丛生物土壤结皮下土壤为对照(CK),2023 年 9 月分别采集白滨藜、柠条、狭叶锦鸡儿和油蒿 4 种旱生灌丛 + 藻-地衣结皮/藓类结皮下 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土样 120 个,藻-地衣结皮和藓类结皮下土样 30 个为对照,研究灌丛与生物土壤结皮互作对土壤养分的影响,灌丛形态见(表 1)。具体采样方法:选择研究区内面积为 50 m×50 m 的 3 个具有代表性地段,在样地内分别选取 4 种灌丛和无灌丛有藻-地衣结皮和藓类结皮的 5 个点,共计 50 个点。使用内径 5 cm 土钻采集同一处理下不同土层的土样并同层混匀。过筛去掉土壤中可见的植物根系和残体,用自封袋封好带回实验室处理。

### 1.3 样品测定方法

土样风干并过筛后,分别采用重铬酸钾容量法<sup>[22]</sup>、烘干法<sup>[22]</sup>、电位测定法<sup>[22]</sup>、凯氏定氮法<sup>[22]</sup>、碱解扩散法<sup>[22]</sup>、硫酸-高氯酸消煮法<sup>[22]</sup>、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>、NaOH 熔融-火焰光度计法<sup>[22]</sup>和

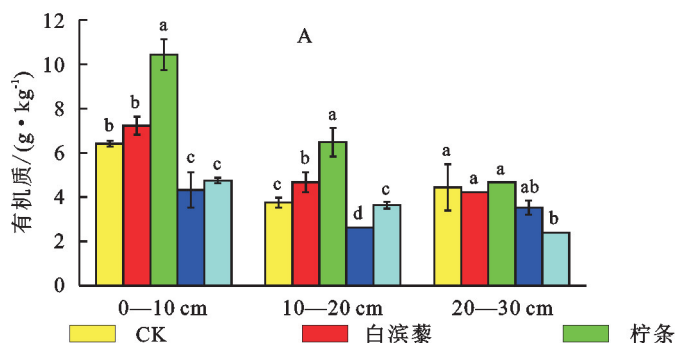
$\text{NH}_4\text{Ac}$ -火焰光度计法<sup>[22]</sup>测定土壤有机质(SOM)、含水量(SWC)、pH值、全氮(TN)、速效氮(AN)、全磷(TP)、速效磷(AP)、全钾(TK)、速效钾(AK)含量。

表1 4种灌丛形态特征

灌丛	冠幅面积/ $\text{m}^2$	株高/ $\text{m}$	基径/ $\text{cm}$
白滨藜	$0.36 \pm 0.06$	$0.45 \pm 0.04$	$0.31 \pm 0.02$
柠条	$4.20 \pm 0.15$	$0.91 \pm 0.08$	$0.63 \pm 0.35$
狭叶锦鸡儿	$2.50 \pm 0.09$	$0.64 \pm 0.05$	$0.44 \pm 0.03$
油蒿	$0.45 \pm 0.07$	$0.82 \pm 0.04$	$0.58 \pm 0.04$

#### 1.4 数据处理与分析

数据采用 Microsoft Office Excel 2021 进行统计和整理,采用 Origin 15 进行图表绘制,采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析,单因素方差分析(ANOVA)用于分析灌丛对生物土壤结皮下土壤 pH 值, SOM, TN, AN, TP, AP, TK, AK 的影响及土层间差异,采用多因素方差分析结皮类型、土层深度与灌丛类型间的互作对土壤养分的影响。



注:CK(藻-地衣结皮或藓类结皮);图中不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图1 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤有机质含量的影响

Fig. 1 Influence of shrubs on soil organic matter content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

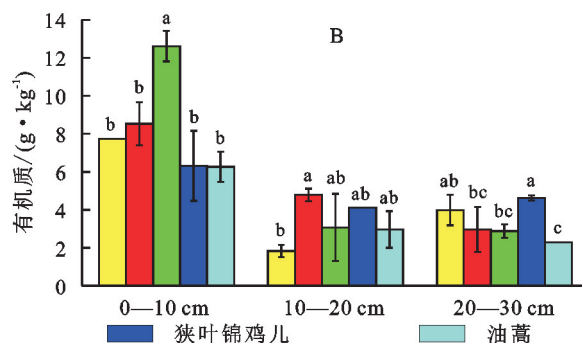
#### 2.2 灌丛对生物土壤结皮下土壤全氮(TN)的影响

由图 2A 和图 2B 可见,白滨藜、柠条、狭叶锦鸡儿和油蒿可提高藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤 TN 含量。0—10 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TN 含量从大到小依次为柠条 0.71 g/kg、白滨藜 0.50 g/kg、油蒿 0.32 g/kg、狭叶锦鸡儿 0.25 g/kg,其中,柠条和白滨藜显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TN 含量也表现为柠条、白滨藜和油蒿高于藻-地衣结皮,其中,柠条和白滨藜与对照差异均达到了显著水平( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层,灌丛+藓类结皮下 TN 含量从大到小依次为柠条 0.97 g/kg、白滨藜 0.62 g/kg、狭叶锦鸡儿 0.60 g/kg、油蒿 0.32 g/kg,且柠条、白滨藜和狭叶锦鸡儿显著高于对照( $p < 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藓类结皮下土壤 TN 含量也表现为柠条、白滨藜、油蒿和狭叶锦鸡儿高于藓类结

## 2 结果与分析

### 2.1 灌丛对生物土壤结皮下土壤有机质(SOM)的影响

由图 1A 和图 1B 知,白滨藜、柠条可提高藻-地衣结皮和藓类结皮下 SOM 含量。0—10 cm 土层,4 种灌丛+藻-地衣结皮下 SOM 含量从大到小依次为柠条 10.43 g/kg、白滨藜 7.23 g/kg、油蒿 4.74 g/kg、狭叶锦鸡儿 4.32 g/kg,其中,柠条+藻-地衣结皮显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ );10—20 cm 土层,柠条与白滨藜+藻-地衣结皮 SOM 含量显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ );20—30 cm 土层,柠条高于对照但无明显差异( $p > 0.05$ )。0—10 cm 土层,灌丛+藓类结皮下 SOM 含量从大到小依次为柠条 12.63 g/kg、白滨藜 8.54 g/kg、狭叶锦鸡儿 6.32 g/kg、油蒿 6.26 g/kg,柠条显著高于其他灌丛和对照( $p < 0.05$ );10—20 cm 土层,4 种灌丛+藓类结皮下 SOM 含量均高于对照,白滨藜有显著差异;20—30 cm 土层,狭叶锦鸡儿高于对照,但二者间无显著差异( $p > 0.05$ )。



皮,并与对照差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 灌丛对生物土壤结皮下土壤速效氮(AN)的影响

由图 3A 和图 3B 可知,白滨藜可提高生物土壤结皮下土壤 AN 含量。0—10 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AN 含量从大到小依次为白滨藜 4.78 mg/kg、油蒿 3.15 mg/kg、柠条 2.73 mg/kg、狭叶锦鸡儿 1.28 mg/kg,其中,白滨藜和油蒿显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AN 含量均表现为白滨藜高于藻-地衣结皮,其中,白滨藜与对照在 20—30 cm 土层差异达到了显著水平( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层,灌丛+藓类结皮下 AN 含量从大到小依次为柠条 4.90 mg/kg、白滨藜 4.73 mg/kg、狭叶锦鸡儿 2.45 mg/kg、油蒿 1.93 mg/kg,且柠条、白滨藜显著高于对照( $p < 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藓类结皮下土壤 AN 含量表现为白滨藜显著高于藓类结皮( $p < 0.05$ )。

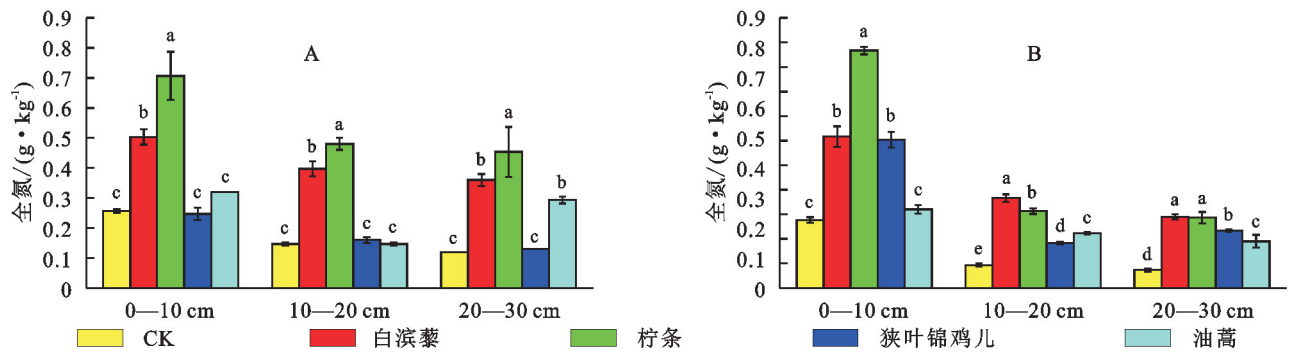


图 2 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤全氮含量的影响

Fig. 2 Influence of shrubs on soil total nitrogen content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

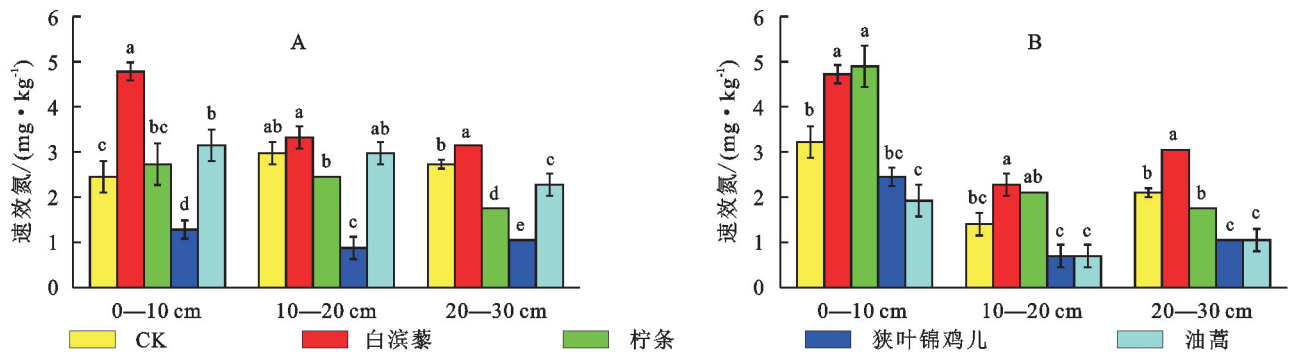


图 3 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤速效氮含量的影响

Fig. 3 Influence of shrubs on soil available nitrogen content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

## 2.4 灌丛对生物土壤结皮下土壤全磷(TP)的影响

图 4A 和图 4B 显示,灌丛降低了藓类结皮下土壤 TP 的含量,但白滨藜、柠条和油蒿灌丛可提高藻-地衣结皮下土壤 TP 含量。0—10 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TP 含量从大到小依次为油蒿、白滨藜、柠条、狭叶锦鸡儿,分别是 0.096,0.086,0.076,0.067 g/kg,其中,油蒿显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TP 含量

也表现为油蒿、白滨藜和柠条高于对照,油蒿均显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层,灌丛+藓类结皮下 TP 含量从大到小依次为油蒿、狭叶锦鸡儿、白滨藜、柠条,分别为 0.090,0.089,0.087,0.086 g/kg,都低于藓类结皮但与对照无显著差异( $p > 0.05$ );10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藓类结皮下土壤 TP 含量仍表现为藓类结皮高于 4 种灌丛,在 20—30 cm 土层与 4 种灌丛的差异显著( $p < 0.05$ )。

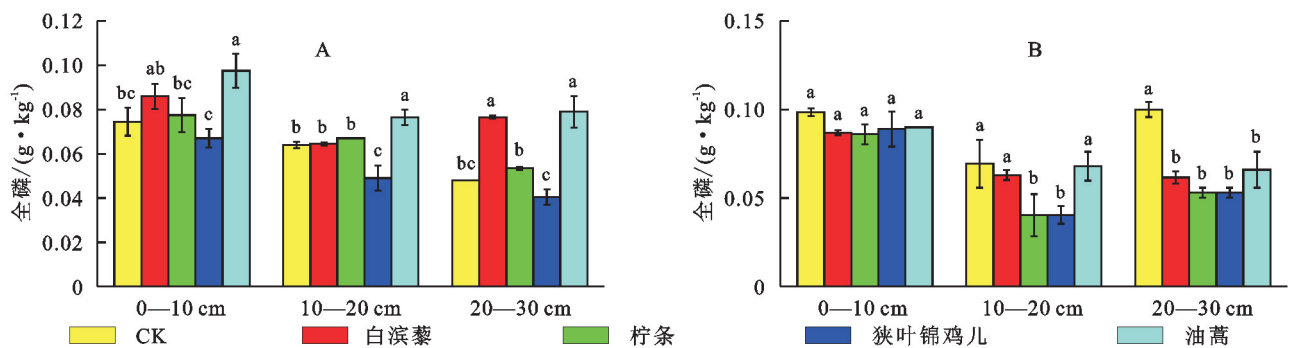


图 4 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤全磷含量的影响

Fig. 4 Influence of shrubs on soil total phosphorus content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

## 2.5 灌丛对生物土壤结皮下土壤速效磷(AP)的影响

图 5A 和图 5B 表明,柠条提高藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤 AP 含量。0—10 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AP 含量从大到小依次为柠条 4.60 mg/kg、白滨藜 4.25 mg/kg、狭叶锦鸡儿 3.70 mg/kg、油蒿 2.19 mg/kg,与藻-地衣结皮无显著差异( $p > 0.05$ );

在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AP 含量表现为柠条高于藻-地衣结皮,其中,柠条与对照在 10—20 cm 土层差异达到了显著水平( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层,灌丛+藓类结皮下 AP 含量从大到小依次为狭叶锦鸡儿 5.80 mg/kg、柠条



5.74 mg/kg、白滨藜 4.00 mg/kg、油蒿 2.99 mg/kg, 狭叶锦鸡儿、柠条和白滨藜显著高于对照( $p < 0.05$ );

10—20 cm 和 20—30 cm 土层狭叶锦鸡儿均显著高于藓类结皮( $p < 0.05$ )。

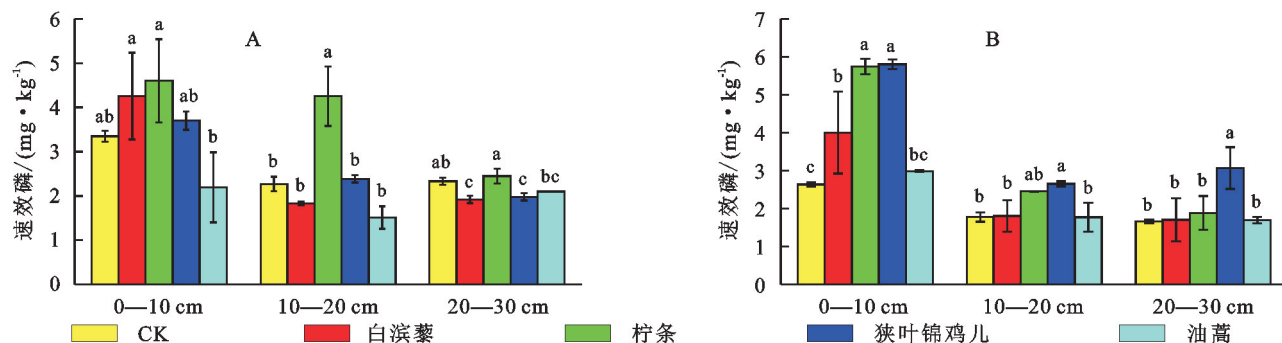


图5 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤速效磷含量的影响

Fig. 5 Influence of shrubs on soil available phosphorus content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

## 2.6 灌丛对生物土壤结皮下土壤全钾(TK)的影响

根据图 6A 和图 6B, 白滨藜可提高藻-地衣结皮下土壤全钾含量, 柠条、油蒿和狭叶锦鸡儿 3 种灌丛可提高藓类结皮下土壤 TK 含量。

0—10 cm 土层, 灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TK 含量从大到小依次为白滨藜、柠条、油蒿、狭叶锦鸡儿, 分别是 167.90, 148.55, 130.70, 123.67 g/kg, 其中, 白滨藜显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ ); 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 灌丛+藻-地衣结皮下土壤 TK 含

量表现为白滨藜、柠条和油蒿高于藻-地衣结皮, 白滨藜与对照在 10—20 cm 土层差异显著( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层, 灌丛+藓类结皮下 TK 含量从大到小依次为柠条、狭叶锦鸡儿、油蒿、白滨藜, 分别是 168.73, 144.20, 132.20, 23.40 g/kg, 柠条、油蒿、狭叶锦鸡儿 3 种灌丛与对照有显著差异( $p < 0.05$ ); 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 灌丛+藓类结皮下土壤 TK 含量表现为柠条和油蒿均显著高于藓类结皮, 相较于对照差异显著( $p < 0.05$ )。

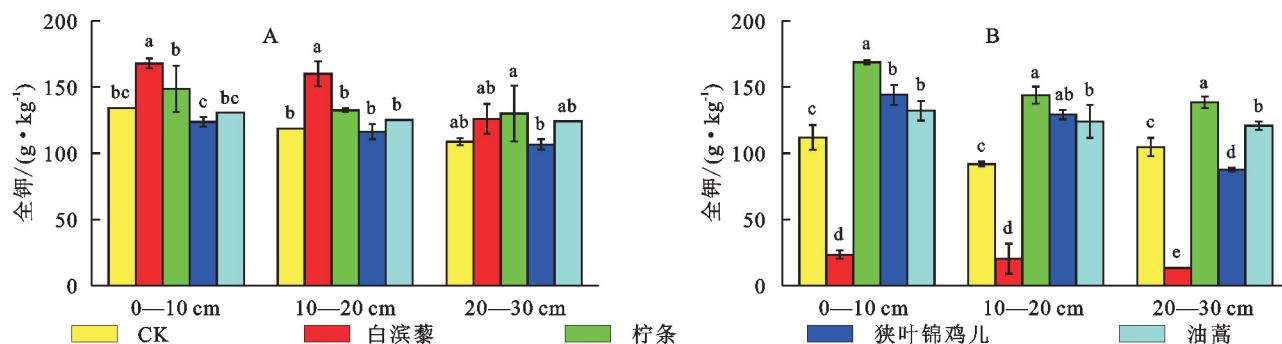


图6 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤全钾含量的影响

Fig. 6 Influence of shrubs on soil total potassium content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

## 2.7 灌丛对生物土壤结皮下土壤速效钾(AK)的影响

据图 7A 和图 7B 可知, 柠条、白滨藜、狭叶锦鸡儿 3 种灌丛可提高藻-地衣结皮和藓类结皮下土壤 AK 含量。

0—10 cm 土层, 灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AK 含量从大到小依次为白滨藜 121.60 mg/kg、狭叶锦鸡儿 120.90 mg/kg、柠条 117.22 mg/kg、油蒿 101.32 mg/kg, 4 种灌丛均显著高于藻-地衣结皮( $p < 0.05$ ); 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 灌丛+藻-地衣结皮下土壤 AK 含量表现为柠条、白滨藜和狭叶锦鸡儿高于藻-地衣结皮, 这 3 种灌丛与对照差异达到了显著水平( $p < 0.05$ )。0—10 cm 土层, 灌丛+藓类结皮下 AK 含量从大到小依次为狭叶锦鸡儿 143.63 mg/kg、白滨藜 104.64 mg/kg、柠条 94.67 mg/kg、油蒿 35.41

mg/kg, 且狭叶锦鸡儿、白滨藜和柠条显著高于对照( $p < 0.05$ ); 10—20 cm 和 20—30 cm 土层, 灌丛+藓类结皮下土壤 AK 含量也表现为狭叶锦鸡儿、柠条和白滨藜高于藓类结皮, 其中, 3 种灌丛与对照在 10—20 cm 土层差异显著( $p < 0.05$ )。

## 2.8 不同土层深度下灌丛+生物土壤结皮的养分变化

4 种灌丛+生物土壤结皮下土壤的 TN, AN, SOM, TP, AP, TK, AK 含量随土层的增加逐渐降低(表 2), 其中 0—10 cm 土层与 10—20 cm 和 20—30 cm 土层之间差异显著( $p < 0.05$ ), 10—20 cm 和 20—30 cm 土层之间除 TK 和 AK 外, 其余养分指标均无差异( $p > 0.05$ )。

## 2.9 灌丛+生物土壤结皮的交互作用对土壤养分的影响

由表 3 可知, 灌丛类型和土层深度极显著影响土

壤 TN,TP,TK,AN,AP,AK,SOM 的含量( $p<0.01$ );结皮类型显著影响除 SOM 和 AP 之外的其他养分指标( $p<0.05$ ),生物土壤结皮与土层深度交互极显著影响 SOM,TN,AN( $p<0.01$ ),显著影响 AP( $p<0.05$ );灌丛与生物土壤结皮交互极显著影响 SOM,

TN,AN,TK,AK 的含量( $p<0.01$ );不同土层深度的灌丛显著影响了除 TP 之外的其余养分指标( $p<0.05$ );结皮类型、土层深度与灌丛类型三者之间存在明显交互显著影响除 AN 和 AP 外的其他 5 种土壤养分指标( $p<0.05$ )。

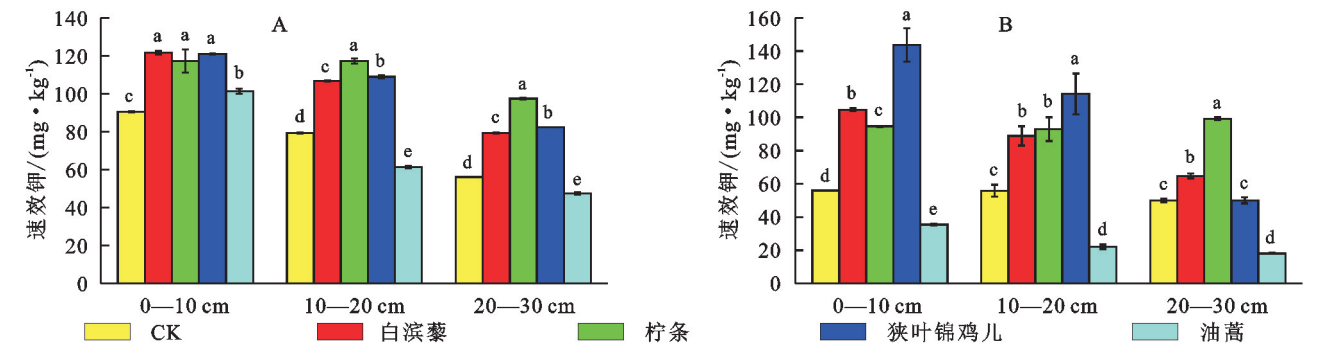


图 7 灌丛对藻-地衣结皮(A)和藓类结皮(B)下土壤速效钾含量的影响

Fig. 7 Influence of shrubs on soil available potassium content under cyanobacteria-lichen crusts (A) and moss crusts (B)

表 2 灌丛+生物土壤结皮下土层深度多重比较

Table 2 Multiple comparisons of soil depth under shrubs-biocrusts

土层深度/与前列对比的		7 个养分指标多重比较的平均值差值						
cm	土层深度/cm	SOM	TN	AN	TP	AP	TK	AK
0—10	10—20	3.5708*	0.2517*	1.3037*	0.029889*	1.686644*	15.4680*	15.8660*
	20—30	4.0120*	0.2558*	1.2519*	0.027222*	1.926288*	22.3474*	36.8470*
10—20	0—10	−3.5708*	−0.2517*	−1.3037*	−0.029889*	−1.686644*	−15.4680*	−15.8660*
	20—30	0.4411	0.0042	−0.0518	−0.002667	0.239644	6.8794*	20.9810*
20—30	0—10	−4.0120*	−0.2558*	−1.2519*	−0.027222*	−1.926288*	−22.3474*	−36.8470*
	10—20	−0.4411	−0.0042	0.0518	0.002667	−0.239644	−6.8794*	−20.9810*

注: \* 代表  $p<0.05$ ,表中数值为多重比较的平均值差值。

表 3 灌丛+生物土壤结皮对土壤养分影响的多因素分析

Table 3 Multifactorial analysis of the effect of shrubs-biocrusts on soil nutrients

变异来源	自由度	7 个养分指标主体间效应检验的Ⅲ类平方和						
		SOM	TN	AN	TP	AP	TK	AK
结皮类型	1	1.07	0.02**	0.93*	0.00**	0.52	13259.52**	6655.65**
土层深度	2	174.97**	1.03**	22.90**	0.01**	46.84**	6182.76**	16539.62**
灌丛类型	3	30.74**	1.02**	40.98**	0.00**	18.86**	26439.55**	38001.51**
结皮类型×土层深度	2	19.14**	0.10**	5.08**	0.00	4.07*	99.26	14.24
结皮类型×灌丛类型	3	46.60**	0.21**	9.42**	0.00	4.56	51296.09**	4371.26**
土层深度×灌丛类型	6	33.20**	0.28**	3.86**	0.00	7.73*	1834.28**	5724.62**
结皮类型×土层深度×灌丛类型	6	35.47**	0.12**	2.07	0.00*	3.92	1905.89**	3737.41**

注: \* 代表  $p<0.05$ ; \*\* 代表  $p<0.01$ ,表中数值为主体间效应检验的Ⅲ类平方和。

### 3 讨论

氮素是影响植物生长和土壤肥力最重要的养分元素,本研究发现灌丛与生物土壤结皮互作提高了土壤 TN 含量,这可能是柠条和狭叶锦鸡儿为豆科固氮植物,通过根系根瘤菌发挥固氮作用增加土壤 TN 含量,但柠条显著高于狭叶锦鸡儿,这可能是由以下两种原因造成,一是柠条定植年限相对较长,二是灌丛+生物结皮下土壤不同。白滨藜灌丛生长低矮、枝

叶茂盛,集聚了大量的枯落物,并与生物土壤结皮共同截留周边物质增加土壤 TN 和 SOM 含量,这与刘学东等<sup>[17]</sup>对柠条和油蒿灌丛土壤养分效应的研究有类似结论。白滨藜与生物土壤结皮互作显著提高了土壤 AN 的含量,其余 3 种灌丛+生物结皮下土壤的 AN 甚至低于对照地,这可能是柠条、狭叶锦鸡儿和油蒿 3 种灌丛与生物土壤结皮互作促进了土壤微生物的活动,增加了土壤氮的消耗,同时灌丛自身生长也需要消耗 AN,从而降低了土壤中 AN 的含量。灌

丛与生物结皮互作一定程度增加了藻类结皮下土壤 TP 含量,降低了藓类结皮下土壤 TP 含量,藓类结皮可以分泌有机物质促进灌丛对磷的吸收,使土壤中磷的含量降低,但二者互作对土壤 TP 和 AP 的影响不显著( $p>0.05$ ),这可能是土壤 P 素主要与土壤风化有关,在土壤中比较稳定移动性较差,受互作效应不明显,这与韩志立等<sup>[23]</sup>对温带荒漠灌丛和藓类结皮对土壤养分的研究结论一致。白滨藜灌丛提高了藻-地衣结皮 AK 含量却降低了藓类结皮 AK 含量,这可能是两种不同生物结皮与灌丛互作使土壤中 K 素的矿化及分解程度不同或生物、非生物影响造成,因目前几乎未见白滨藜灌丛与土壤养分关系的研究,究其原因还需进一步深入研究。

此外,4 种灌丛+生物土壤结皮下土壤养分随土层加深呈现递减趋势,土壤 TN, AN, TP, AP, TK, AK, SOM 在 0—10 cm 土层最大富集,其与前人发现的生物结皮覆盖下 0—10 cm 土壤的养分含量均高于深层土壤的结论相一致<sup>[24-25]</sup>。其原因可能是研究区为沙地,土壤养分来源主要是灌丛凋落物、植物根系脱落和生物结皮养分供给等。灌丛+生物土壤结皮下土壤 TK 和 AK 在不同深度土层还存在显著差异,说明灌丛与生物结皮互作对土壤不同养分的富集程度有差异性。

## 4 结论

灌丛与生物土壤结皮互作影响土壤养分,4 种灌丛+生物土壤结皮都提高了土壤 TN 含量,柠条、白滨藜和狭叶锦鸡儿灌丛与生物土壤结皮互作提高了土壤 AK 含量和藓类结皮 AP 含量,柠条、油蒿和狭叶锦鸡儿+藓类结皮互作提高了土壤 TK 含量,白滨藜、柠条和油蒿+藻-地衣结皮提高了土壤 TP 含量,白滨藜和柠条+生物土壤结皮互作提高了 SOM,白滨藜、柠条与生物土壤结皮互作分别提高了土壤 AN 和藻-地衣结皮 AP 含量,表明灌丛与生物土壤结皮互作一定程度上能增加土壤肥力,改良土壤质量,形成稳定的沙漠生态防护系统,但灌丛+藓类生物结皮降低了土壤 TP 含量。同土层灌丛+藓类结皮下土壤 TN, TP, AK, SOM 含量高于藻-地衣结皮,表明土壤养分也受结皮发育阶段的影响,即结皮演替有利于提高土壤养分。4 种灌丛+生物土壤结皮下土壤养分富集于 0—10 cm 土层,表聚效应明显,灌丛、生物结皮与土层深度三者间互作对土壤养分的富集能力还存在差异性。

### 参考文献(References):

[1] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,

2003,1(4):181-189.

- [2] 韩梦梦,罗忻武,粟春青,等.生物结皮对土壤养分及碳循环影响的研究进展[J].*北方园艺*,2023(24):132-137.  
Han M M, Luo X W, Su C Q, et al. Research progress on the effect of biological crust on soil nutrients and carbon cycling[J]. *Northern Horticulture*, 2023(24):132-137.
- [3] 赵洋,陈永乐,徐冰鑫.油蒿(*Artemisia ordosica*)退化阶段对生物土壤结皮拓殖和发育的影响[J].*中国沙漠*,2016,36(4):983-989.  
Zhao Y, Chen Y L, Xu B X. Effect of degradation stage of *Artemisia ordosica* on colonization and development of biological soil crusts[J]. *Journal of Desert Research*, 2016,36(4):983-989.
- [4] 杨航宇,刘艳梅,王廷璞,等.生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物数量和活性的影响[J].*中国沙漠*,2017,37(5):950-960.  
Yang H Y, Liu Y M, Wang T P, et al. Effects of biological soil crusts on the amount and activities of soil microbes in desert areas[J]. *Journal of Desert Research*, 2017,37(5):950-960.
- [5] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions[J]. *Advances in Ecological Research*, 1990,20:179-223.
- [6] 周小泉,刘政鸿,杨永胜,等.毛乌素沙地三种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J].*水土保持研究*,2014,21(6):340-344.  
Zhou X Q, Liu Z H, Yang Y S, et al. Effects of moss dominated crusts on soil physicochemical properties under three types of vegetation in Mu Us Sandland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(6):340-344.
- [7] 杨建振.陕北毛乌素沙地生物结皮的土壤水分效应及其人工培育技术初探[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.  
Yang J Z. Preliminary study on soil moisture effect and artificial cultivation technology of biological crust in Mu Us Sandy Land of northern Shaanxi [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010.
- [8] 蒙仲举,任晓萌,高永.采煤沉陷区不同类型植被恢复对土壤结皮的影响[J].*内蒙古林业*,2014(4):10-11.  
Meng Z J, Ren X M, Gao Y. Effects of different types of vegetation restoration on soil crust in coal mining subsidence area[J]. *Inner Mongolia Forestry*, 2014(4):10-11.
- [9] 李新凯.毛乌素沙地生物结皮的空间分布及多种生态功能研究[D].北京:中国科学院大学,2018.  
Li X K. Spatial distribution and ecological functions of biological crusts in Mu Us Sandy Land [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018.

- [10] 刘艳梅,杨航宇,李新荣.生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物生物量的影响[J].土壤学报,2014,51(2):394-401.  
Liu Y M, Yang H Y, Li X R. Effects of biological soil crusts on soil microbial biomass in desert area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2):394-401.
- [11] 刘艳梅,杨航宇,贾荣亮,等.人为踩踏生物土壤结皮对土壤酶活性的影响[J].中国沙漠,2019,39(4):54-63.  
Liu Y M, Yang H Y, Jia R L, et al. Effects of human trampling biocrusts on soil enzyme activities[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4):54-63.
- [12] 刘任涛.沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系[J].生态学杂志,2014,33(12):3463-3469.  
Liu R T. Formation process and characteristics of “Fertile island” and “Arthropod island” in desertified shrub land and their relations to ecosystem succession[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12):3463-3469.
- [13] 赵哈林,郭轶瑞,周瑞莲.灌丛对沙质草地土壤结皮形成发育的影响及其作用机制[J].中国沙漠,2011,31(5):1105-1111.  
Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L. Effects of shrub on development of soil crust and its mechanism in sandy grassland[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5):1105-1111.
- [14] Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China[J]. Geomorphology, 2008, 96(1/2):221-232.
- [15] 董智今,张呈春,展秀丽,等.宁夏河东沙地生物土壤结皮及其下伏土壤养分的空间分布特征[J].生态环境学报,2023,32(5):910-919.  
Dong Z J, Zhang C C, Zhan X L, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients of biological soil crusts and their underlying soil of sandy land in the east of Yellow River in Ningxia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(5):910-919.
- [16] 张健,徐明,邹晓,等.不同土壤和植被生境下生物结皮对土壤性质的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):323-328.  
Zhang J, Xu M, Zou X, et al. Effects of biological crusts on soil properties under different soil and vegetation habitats[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5):323-328.
- [17] 刘学东,陈林,杨新国,等.荒漠草原2种柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛土壤养分“肥岛”效应[J].西北林学院学报,2016,31(4):26-32,92.  
Liu X D, Chen L, Yang X G, et al. “fertile island” effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4):26-32,92.
- [18] 关林婧,梅续芳,张媛媛,等.狭叶锦鸡儿灌丛沙堆土壤水分和肥力的时空分布[J].干旱区研究,2016,33(2):253-259.  
Guan L J, Mei X F, Zhang Y Y, et al. Spatiotemporal distribution of soil moisture content and fertility of *Caragana stenophylla* shrub nabkhas in different habitats[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2):253-259.
- [19] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J].山地学报,2010,28(6):653-659.  
Zhao J B, Ma Y D, Xing S, et al. Study on moisture content in sand layers of Tengger Desert in Zhongwei, Ningxia[J]. Mountain Research, 2010, 28(6):653-659.
- [20] 赵景波,邢闪,邵天杰,等.腾格里沙漠南缘沙层含水量与水分平衡研究[J].自然资源学报,2012,27(3):480-488.  
Zhao J B, Xing S, Shao T J, et al. A study on content and balance of moisture in the southern Tengger Desert[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3):480-488.
- [21] 杨航宇,刘长仲,刘艳梅,等.荒漠区踩踏生物土壤结皮对土壤微生物量的影响[J].中国沙漠,2019,39(2):35-44.  
Yang H Y, Liu C Z, Liu Y M, et al. Effects of trampling biocrusts on soil microbial biomass in desert areas[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2):35-44.
- [22] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.  
Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [23] 韩志立,张庆,张署军,等.温带荒漠灌丛和藓类结皮对土壤养分的贡献[J].生态学报,2024,44(5):1951-1961.  
Han Z L, Zhang Q, Zhang S J, et al. Contribution of shrubs and moss crusts to soil nutrient in a temperate desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5):1951-1961.
- [24] 王芳芳,肖波,李胜龙,等.黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9):1592-1602.  
Wang F F, Xiao B, Li S L, et al. Biocrusts increase soil nutrient levels by increasing the nutrient retention ability of surface soil on the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2021, 27(9):1592-1602.
- [25] 董金伟,李宜坪,李新凯,等.毛乌素沙地植被类型对生物结皮及其下伏土壤养分的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):112-117.  
Dong J W, Li Y P, Li X K, et al. Effects of vegetation types on biocrusts and the underlying soil nutrients in Mu Us Sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):112-117.