DOI: 10.5846/stxb202002110228
程才,李玉杰,张远东,高敏,李晓娜.石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响.生态学报,2020,40(24): - .
Cheng C, Li Y J, Zhang Y D, Gao M, Li X N. Effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics in karst rocky desertification region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): - .

石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响

程　才[1,2],李玉杰[1,2],张远东[1,2],高　敏[1,2],李晓娜[1,2,*]
1 贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳　550001
2 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳　550001

摘要:苔藓结皮是石漠化生态系统的重要地表覆被物,但其在土壤养分累积和元素循环过程中的作用尚不明确。本文以我国贵州典型喀斯特高原峡谷石漠化区—花江大峡谷两岸不同等级石漠化生境下的苔藓结皮及其覆被土壤为研究对象,研究了苔藓结皮覆被对土壤养分及生态化学计量特征的影响。结果表明:(1) 苔藓结皮层养分含量显著高于下层土壤,结皮覆被土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)平均含量分别为 25.95、3.05、1.00、5.10 g/kg 和 189.61、1.59、275.10 mg/kg,较无结皮覆被的裸土分别增加 46.08%、26.50%、53.62%、20.25%、25.24%、110.47%和 83.76%。(2)苔藓结皮覆被土壤 C/N、C/K、P/K 显著高于裸土,且随土层加深而递减;N/P 显著低于裸土,且随土层加深而升高。(3)苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数为 33.16%—72.48%,呈现随石漠化等级升高而增加的趋势,中度和强度石漠化阶段较无石漠化阶段分别增加 83.26%和 118.58%。本研究表明苔藓结皮能有效促进土壤养分累积,加速石漠化土壤养分恢复进程,可作为补充手段联合其它生态恢复措施共同推动石漠化地区的生态恢复与重建。

关键词:石漠化;苔藓结皮;土壤养分恢复;生态化学计量学

Effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics in karst rocky desertification region

CHENG Cai[1,2], LI Yujie[1,2], ZHANG Yuandong[1,2], GAO Min[1,2], LI Xiaona[1,2,*]
1 *School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001, *China*
2 *State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang* 550001, *China*

Abstract: Moss crusts are an important ground cover in rocky desertification ecosystems, but its roles in soil nutrient accumulation and element cycles are still unclear. In this paper, the effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics were studied in different degrees of rocky desertification on both sides of Huajiang gorge, a typical karst plateau gorge in Guizhou Province. The results showed that: (1) the soil nutrient content in moss crusts layer were significantly higher than those in subsoil. The mean contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali-hydrolysis nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) in moss crusts were 25.95, 3.05, 1.00, 5.10 g/kg and 189.61, 1.59, 275.10 mg/kg, which were 46.08%, 26.50%, 53.62%, 20.25%, 25.24%, 110.47% and 83.76% higher than those in bare soil, respectively. (2) Decreased with the increase of soil depth, C/N, C/K and P/K in moss crusts were significantly higher than those in bare

基金项目:贵州省国内一流学科建设项目"贵州师范大学地理学"(黔教科研发[2017]85 号);国家自然科学基金(31960262);贵州省科技计划项目(黔科合 LH[2016]7199 号)
收稿日期:2020-02-11;　　**网络出版日期**:2020- -
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maidoulxn413@163.com

soil. N/P in moss crusts was significantly lower than that in bare soil, while increased with the increase of soil depth. (3) The nutrient restoration index of moss crusts ranged from 33.16% to 72.48%, and showed a trend of increase with the ecological deterioration. The nutrient restoration index in moderate and severe rocky desertification stages was 83.26% and 118.58% higher than that in none rocky desertification stage. Our results demonstrated that moss crusts could effectively promote soil nutrient accumulation and accelerate soil nutrient restoration process, and could be involved as a supplementary method in promoting ecological restoration and reconstruction in karst rocky desertification regions.

Key Words: rocky desertification; moss crusts; soil nutrient restoration; ecological stoichiometry

我国西南喀斯特山区地质脆弱性与环境敏感性并存,环境承载力低,人类活动突破生态系统健康阈值,使得此区域生态环境退化,水土流失频繁发生,碳酸盐岩裸露,衍生出石漠化灾害[1-2]。石漠化介导的土壤结构退化、滞水纳墒能力降低、养分流失等一系列土壤退化过程导致喀斯特生态系统结构和功能退化[3-4]。石漠化生态修复是我国生态文明建设的主战场之一,尽管近几十年石漠化治理取得丰硕成果,植被覆盖面积不断增长,裸岩率逐步得到控制,但随着石漠化生态修复进程的不断推进,群落稳定性差、土壤质量恢复滞后、生态治理效益疲弱等忽视植被正向演替机理和规律的弊端不断出现[5],制约当地经济、社会、生态等方面的可持续发展[6]。

苔藓结皮是由苔藓植物假根粘结土壤颗粒而形成的具有稳定结构的地表复合体,在很多脆弱或受损生态系统中占据着重要的生态位[7]。诸多学者已在我国西北沙漠化地区和黄土高原地区对苔藓结皮生态功能开展了系列基础研究,表明苔藓结皮覆被显著影响土壤物理、化学和生物学属性,可有效增强土层稳定性和抗蚀性[8],提高土壤养分含量和酶活性[9-10],为维管束植物的定居创造有利生境条件[11]。由于苔藓结皮具有繁殖快、生态效益高等优点,其已被人工运用于受损生态系统的修复[12-13]。Bu 等人在黄土高原地区仅用两个月便成功培育出苔藓结皮,建立苔藓结皮人工培育和扩繁技术体系[14],且人工培育的结皮仍可有效固定土壤和增强土壤肥力[15-16],表明苔藓结皮作为一种新型生态修复材料在修复受损生态系统方面具有较高的应用价值[17]。苔藓结皮作为全球陆地生态系统中重要的地表覆被物,是当前全球碳循环和生物地球化学循环研究的热点话题[18],其一系列微生态过程不仅显著影响土壤养分含量,还可能同时改变土壤营养元素的动态平衡,影响生态系统结构和功能。

生态化学计量学作为研究生态系统元素比例关系和平衡关系的重要方法,被广泛运用于揭示各元素在生态过程中的耦合关系和共变规律[19-20]。碳、氮、磷、钾不仅是土壤重要的营养元素,更是表征土壤肥力质量的重要指标,其生态化学计量特征可以有效预测养分限制类型和阈值,反映土壤供肥能力和质量状况[21]。因而从生态化学计量学的角度分析苔藓结皮覆被对土壤养分的贡献,可能更好地揭示苔藓结皮在退化或受损生态系统中对土壤养分的供给和持续能力[22]。苔藓结皮作为石漠化生态系统的重要地表覆被物,但其在土壤养分累积和元素循环过程中的作用尚不明确。为此,本文选取我国贵州典型喀斯特高原峡谷石漠化区—花江大峡谷两岸为研究区,系统研究不同等级石漠化生境下苔藓结皮覆被对土壤养分含量和生态化学计量特征的影响,以期为利用苔藓结皮进行石漠化生态修复提供科学依据;同时,在一定程度上也是对全球生物结皮生态化学计量学研究资料的积累与丰富。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省关岭县与贞丰县交界处的花江大峡谷两岸(25°39′13″—25°41′00″N, 105°36′30″—105°46′30″E),是一个典型的喀斯特高原峡谷石漠化区,研究区总面积 47.91 km^2,海拔 600—1200 m,属亚热带湿润季风气候,年均降雨量约 1100 mm,5—10 月降雨量占全年降雨量的 83%,年均温 18.4 ℃。研究区的典型特征是景观破碎,石漠化广泛分布,以中强度石漠化为主。土壤类型为石灰岩发育而来的石灰土。植被为

亚热带常绿落叶针阔混交林,原生植被基本被破坏,现以次生林为主,主要包括圆柏(*Sabina chinensis*)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)、金银花(*Lonicera japonica*)、核桃(*Carya cathayensis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等。结皮苔藓种类主要包括毛口藓(*Trichostomum brachydontium*)、穗枝赤齿藓(*Erythrodontium julaceum*)、密叶拟鳞叶藓(*Pseudotaxiphyllum densum*)、南亚灰藓(*Hypnum oldhamii*)等。

1.2　样品采集与指标测定

参考熊康宁等人的石漠化等级划分方法[23],选取无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化各 3 块样地(图 1),样地大小为 20 m × 20 m,各样地最小间隔为 500 m。由于石漠化生境的破碎性、非连续性和不均匀性,石漠化区域植被分散分布,植被下和植被间分布着苔藓结皮斑块和无结皮覆盖的裸土[24]。于 2019 年 5 月在各样地内按坡位上、中、下各选择 3 处(每一样地内共 9 处)苔藓结皮发育良好的小样方,采集结皮斑块中心 10 cm × 10 cm 的苔藓结皮及其覆被下 0—5 cm 和 5—10 cm 土壤,同一样地内同层土壤充分混匀成一个样。按相同采样方法采集无苔藓结皮覆被的裸土作为对照,共采集土壤样品 60 份。土壤样品带回实验室自然风干后研磨过 2 mm 筛,于玻璃瓶中密封保存,用于土壤养分测定。

图 1　研究区石漠化景观和苔藓结皮

Fig.1　Pictures of rocky desertification and moss crusts in the study area

土壤 pH 采用 2.5:1 的水土比,用电位计法测定;有机碳(SOC)采用硫酸重铬酸钾氧化为容量法测定;全氮(TN)采用硫酸钾为硫酸铜为硒粉消煮,定氮仪自动分析法测定;全磷(TP)采用硫酸为高氯酸消煮为钼锑抗比色法测定;全钾(TK)采用氢氟酸为高氯酸消煮火焰光度计法测定;碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提为钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)采用中性乙酸铵提取为火焰光度计法测定。

土壤养分恢复指数(NRI)[22]:以裸土为对照,计算苔藓结皮覆被土壤 SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK 与裸土的差异,最后将各属性的差值求和平均,以定量描述苔藓结皮覆被对土壤养分的影响。土壤养分恢复指数的计算公式为:

$$\mathrm{NRI} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}((x_i - x'_i)/x'_i) \times 100\% \tag{1}$$

式中,NRI 为土壤养分恢复指数,x_i为苔藓结皮覆被土壤第 i 个土壤养分值,x'_i为裸土第 i 个土壤养分值。

1.3　数据处理

土壤 C、N、P、K 化学计量比采用元素质量比,使用 Excel 2010 对数据进行初步整理,运用 SPSS 22.0 对土

壤养分含量、化学计量比进行双因素方差分析(two-way ANOVA)和 Tukey 多重比较。运用 Kolmogorov-Smirnov text 检验数据的正态性,Levene's test 进行方差齐性检验。

2 结果与分析

2.1 苔藓结皮覆被土壤养分及化学计量比垂直分布特征

苔藓结皮覆被土壤养分含量呈现随土层加深而递减的趋势,结皮层土壤养分含量显著高于下层土壤(表 1)。结皮层 SOC 和 TN 含量分别为 23.53—41.79 g/kg 和 2.81—4.07 g/kg,均表现为无石漠化>强度石漠化>中度石漠化>轻度石漠化。与结皮层相比,0—5 cm 和 5—10 cm 的 SOC 含量分别减少 24.02%和 44.41%,TN 含量分别减少 16.10%和 27.44%。苔藓结皮层 TP 和 TK 含量分别为 1.22—1.94 g/kg 和 4.56—7.02 g/kg,表现为无石漠化最高,强度石漠化最低。与结皮层相比,0—5 cm 和 5—10 cm 的 TP 含量分别减少 57.30%和 112.12%,TK 含量分别减少 11.04%和 23.44%。结皮层 AN 和 AK 含量分别为 201.00—241.37 mg/kg 和 238.72—409.11 mg/kg。与结皮层相比,0—5 cm 和 5—10 cm 的 AN 含量分别减少 18.46%和 30.21%,AK 含量分别减少 35.73%和 65.14%。苔藓结皮层 AP 含量为 1.48—3.96 mg/kg,0—5 cm 和 5—10 cm 的 AP 含量较结皮层分别减少 61.76%和 94.69%。双因素交互分析显示,石漠化等级和土层深度对苔藓结皮覆被土壤养分指标均具有显著影响,石漠化等级 × 土层深度仅对 TN 具有显著影响。

表 1 石漠化等级和土层深度对苔藓结皮覆被土壤养分含量的影响

Table 1 Effects of the degree of rocky desertification and soil depth on soil nutrient contents in moss crusts (mean ± SD)

土层深度 Soil depth	有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	全氮 Total nitrogen/(g/kg)	全磷 Total phosphorus/(g/kg)	全钾 Total potassium/(g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolysis nitrogen/(mg/kg)	速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	速效钾 Available potassium /(mg/kg)
无 None							
结皮层 Crust	41.79±0.71a	4.07±0.33a	1.94±0.33a	7.02±0.18a	241.37±22.38a	3.96±0.71a	389.60±166.82a
0—5 cm	31.92±1.42b	3.16±0.14b	1.14±0.29b	6.41±0.07b	206.42±22.06b	2.07±0.28b	298.62±45.21a
5—10 cm	26.32±2.79c	2.78±0.24b	0.85±0.20b	5.49±0.24c	165.62±31.34b	1.89±0.25b	262.47±61.65a
轻度 Light							
结皮层 Crust	23.53±2.07a	2.81±0.06a	1.27±0.22a	6.27±0.53a	201.00±14.76a	1.68±0.23a	238.72±79.62a
0—5 cm	20.08±1.61b	2.64±0.26ab	0.91±0.31a	5.24±0.09b	165.66±17.66b	1.34±0.12a	187.46±29.97a
5—10 cm	17.31±0.51c	2.48±0.12b	0.63±0.10b	4.58±0.43c	152.98±11.48b	1.25±0.29a	156.78±15.84a
中度 Moderate							
结皮层 Crust	28.22±3.72a	3.33±0.10a	1.26±0.35a	4.71±0.12a	201.83±23.57a	1.48±0.56a	371.95±9.28a
0—5 cm	23.55±2.62ab	2.92±0.10b	0.81±0.09a	4.51±0.28a	173.96±6.12a	0.83±0.24ab	275.30±11.25b
5—10 cm	20.69±0.89b	2.64±0.16c	0.58±0.05b	4.14±0.67a	169.88±14.58a	0.45±0.16b	242.12±12.77c
强度 Severe							
结皮层 Crust	31.18±1.31a	3.60±0.19a	1.22±0.18a	4.56±0.51a	226.87±14.41a	1.85±0.80ab	409.11±77.36a
0—5 cm	25.02±0.73b	3.17±0.07b	0.75±0.17b	4.16±0.02a	189.30±3.28b	1.29±0.17a	276.98±88.84ab
5—10 cm	21.77±2.01c	2.96±0.06c	0.59±0.08b	4.07±0.10a	180.48±3.27c	1.01±0.06b	192.05±34.53b
双因素方差分析 Two-way ANOVA							
石漠化等级 Degree of rocky desertification	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	0.004	< 0.001	0.001
土层深度 Soil depth	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
石漠化等级 × 土层深度 Degree of rocky desertification×Soil depth	0.606	0.025	0.986	0.237	0.456	0.175	0.793
F	29.09	19.26	9.55	19.47	6.61	12.27	4.95
P	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001

不同小写字母表示同一石漠化等级中苔藓结皮覆被土壤养分不同土层间差异显著($P<0.05$)

苔藓结皮覆被土壤 C、N、P、K 化学计量比垂直变化特征各异(表 2)。C/N、C/K、P/K 呈现随土层加深而递减的趋势,C/P 和 N/P 随土层加深而逐渐升高,N/K 在土层剖面上变化特征不明显。双因素交互分析显

示,石漠化等级和土层深度均对 C/N、C/P、N/P、C/K 具有显著影响,P/K 仅受到土层深度的显著影响,石漠化等级 × 土层深度仅对 N/K 具有显著影响。

表 2　石漠化等级和土层深度对苔藓结皮覆被土壤生态化学计量特征的影响

Table 2　Effects of the degree of rocky desertification and soil depth on soil ecological stoichiometry characteristics in moss crusts (mean±SD)

土层深度 Soil depth	C/N	C/P	N/P	C/K	N/K	P/K
无 None						
结皮层 Crust	10.32±0.98a	21.94±3.77a	2.16±0.59a	5.95±0.07a	0.58±0.06a	0.28±0.04a
0—5 cm	10.13±0.81a	29.13±7.26ab	2.87±0.70a	4.98±0.19b	0.49±0.02b	0.18±0.05ab
5—10 cm	9.49±1.09a	31.57±3.91b	3.38±0.68a	4.81±0.73b	0.51±0.05ab	0.16±0.04b
轻度 Light						
结皮层 Crust	8.36±0.58a	18.98±3.73a	2.28±0.47a	3.75±0.03a	0.45±0.03a	0.20±0.04a
0—5 cm	7.62±0.57ab	23.49±6.24ab	3.13±1.02ab	3.83±0.25a	0.50±0.05b	0.17±0.06a
5—10 cm	6.98±0.34b	27.70±3.61b	3.98±0.65b	3.81±0.42a	0.55±0.08b	0.14±0.03a
中度 Moderate						
结皮层 Crust	8.46±0.89a	23.65±7.58a	2.81±0.95a	6.01±0.94a	0.71±0.04a	0.27±0.08a
0—5 cm	8.05±0.69a	29.16±4.53ab	3.62±0.46a	5.25±0.83a	0.65±0.06a	0.18±0.01a
5—10 cm	7.84±0.37a	35.58±2.14b	4.54±0.11b	5.06±0.63a	0.65±0.08a	0.14±0.02b
强度 Severe						
结皮层 Crust	8.68±0.80a	25.75±2.63a	3.00±0.54a	6.92±1.13a	0.79±0.06a	0.27±0.08a
0—5 cm	7.88±0.06b	34.57±7.86ab	4.38±0.97ab	6.01±0.19b	0.76±0.02a	0.18±0.04ab
5—10 cm	7.34±0.54b	37.16±6.21b	5.06±0.67b	5.36±0.59b	0.73±0.03a	0.15±0.02b
双因素方差分析 Two-way ANOVA						
石漠化等级 Degree of rocky desertification	< 0.001	0.013	0.005	< 0.001	< 0.001	0.482
土层深度 Soil depth	0.003	< 0.001	< 0.001	0.005	0.398	< 0.001
石漠化等级×土层深度 Degree of rocky desertification × Soil depth	0.869	0.998	0.998	0.456	0.041	0.928
F	7.13	3.37	4.47	10.04	14.71	3.95
P	< 0.001	0.006	0.001	< 0.001	< 0.001	0.002

不同小写字母表示同一石漠化等级中苔藓结皮覆被土壤化学计量比不同土层间差异显著($P<0.05$)

2.2　石漠化等级梯度下苔藓结皮覆被对土壤养分及化学计量比的影响

土壤养分含量因石漠化等级而变化(图 2)。从裸土的角度,SOC、TN、TP 和 TK 含量均呈现随着石漠化等级升高而降低的趋势,而 AN、AP 和 AK 含量随着石漠化等级升高呈现先减少后增加的趋势,最低值出现在中度石漠化。较裸土而言,苔藓结皮的覆盖显著增加土壤养分含量。SOC 含量平均增加 46.08%,TN 含量平均增加 26.50%,TP 含量平均增加 53.62%,TK 含量平均增加 20.25%,AN 含量平均增加 25.24%,AP 含量平均增加 110.47%,AK 含量平均增加 83.76%。双因素交互分析显示(表 3),石漠化等级和苔藓结皮对各土壤养分指标均具有极显著影响,石漠化等级 × 苔藓结皮仅对 SOC、TN 和 TK 具有显著影响。

苔藓结皮对土壤 C、N、P、K 生态化学计量比影响各异(图 3)。苔藓结皮覆被土壤 C/N、C/K、P/K 显著高于裸土,N/P 显著低于裸土。双因素交互分析显示(表 4),石漠化等级和苔藓结皮均对土壤 C/N、N/P、C/K 具有显著影响,而 N/K 仅受石漠化等级显著影响,P/K 仅受苔藓结皮显著影响,石漠化等级 × 苔藓结皮对各化学计量比均无显著影响。

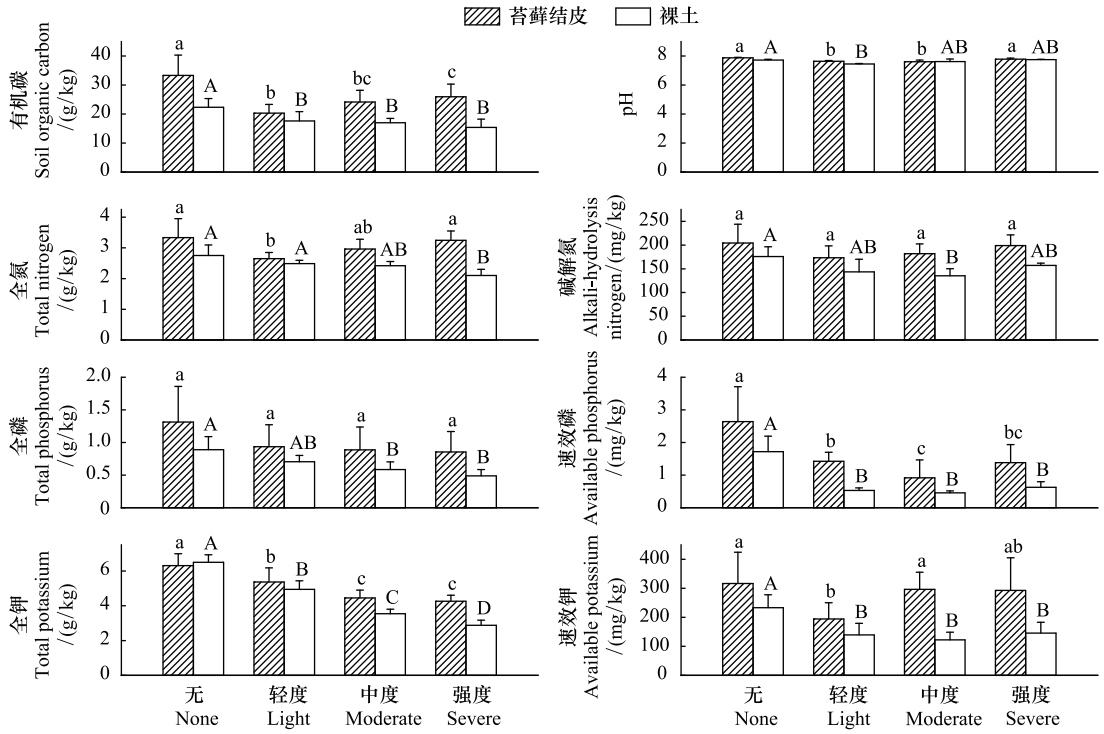

图 2 石漠化等级梯度下苔藓结皮覆被对土壤养分含量的影响

Fig.2 Effects of moss crusts on soil nutrient contents under the degree of rocky desertification

不同小写字母表示同一苔藓结皮覆被土壤化学计量比不同等级石漠化间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一裸土化学计量比不同等级石漠化间差异显著($P<0.05$)

表 3 石漠化等级和苔藓结皮对土壤养分含量的影响

Table 3 Effects of the degree of rocky desertification and moss crusts on soil nutrient contents

项目 Item	有机碳 Soil organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Alkali-hydrolysis nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
石漠化等级 Degree of rocky desertification	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.005	< 0.001	0.006
苔藓结皮 Moss crusts	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
石漠化等级×苔藓结皮 Degree of rocky desertification× Moss crusts	0.011	< 0.001	0.622	< 0.001	0.677	0.243	0.115
F	23.83	27.83	10.79	125.01	7.87	37.88	9.27
P	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

表 4 石漠化等级和苔藓结皮对土壤生态化学计量特征的影响

Table 4 Effects of the degree of rocky desertification and moss crusts on soil ecological stoichiometry characteristics

项目 Item	C/N	C/P	N/P	C/K	N/K	P/K
石漠化等级 Degree of rocky desertification	0.016	0.089	0.022	< 0.001	< 0.001	0.524
苔藓结皮 Moss crusts	0.010	0.465	0.027	0.002	0.217	0.009
石漠化等级×苔藓结皮 Degree of rocky desertification × Moss crusts	0.590	0.961	0.983	0.130	0.155	0.694
F	3.51	1.23	2.68	8.98	20.97	1.80
P	0.018	0.341	0.048	< 0.001	< 0.001	0.157

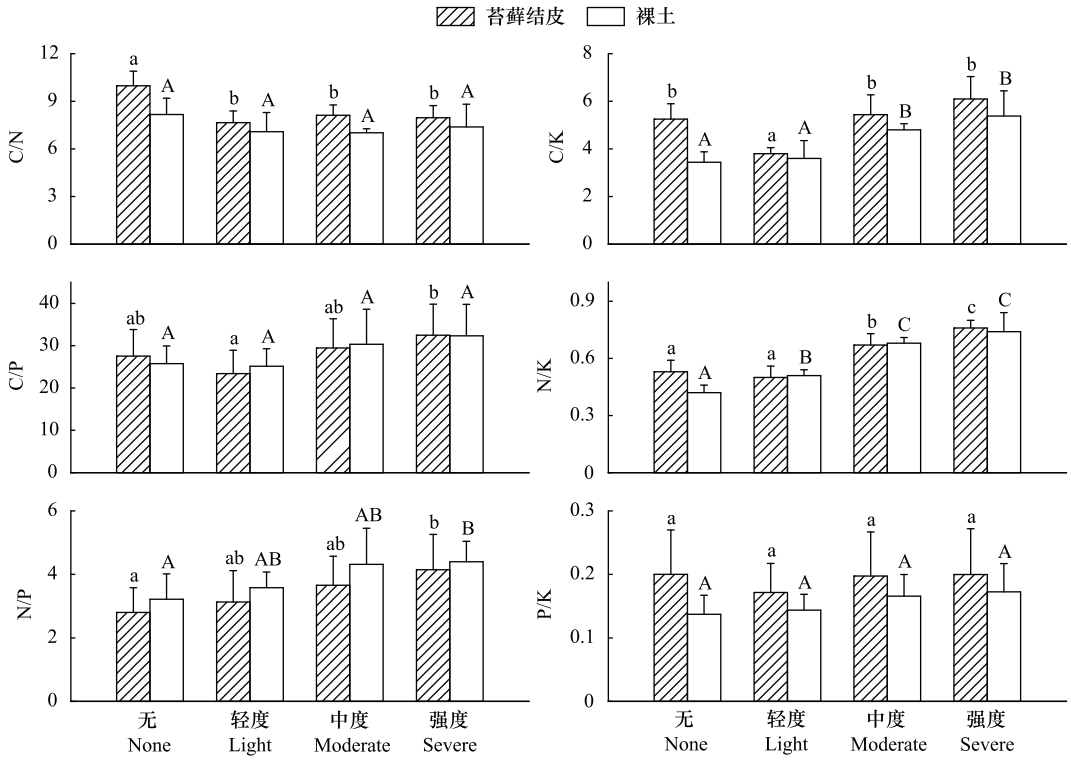

图 3　石漠化等级梯度下苔藓结皮覆被对土壤生态化学计量特征的影响

Fig.3　Effects of moss crusts on soil ecological stoichiometry characteristics under the degree of rocky desertification

不同小写字母表示同一苔藓结皮覆被土壤养分不同等级石漠化间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一裸土养分不同等级石漠化间差异显著($P<0.05$)

2.3　苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数变化特征

苔藓结皮的覆盖均不同程度地促进石漠化土壤养分的恢复(图 4)。苔藓结皮覆被土壤养分恢复平均指数为 33.16%—72.48%,0—5 cm 和 5—10 cm 土壤养分恢复指数分别为 11.30%—49.90%,15.34%—52.80%。土壤养分恢复指数与石漠化等级相关,呈现随石漠化等级升高而增加的趋势,且中度和强度石漠化阶段显著高于无石漠化和轻度石漠化阶段。无石漠化阶段苔藓结皮覆被土壤养分恢复平均指数为 33.16%,中度和强度石漠化阶段分别为 60.77%和 72.48%,较无石漠化阶段分别增加了 83.26%和 118.58%。

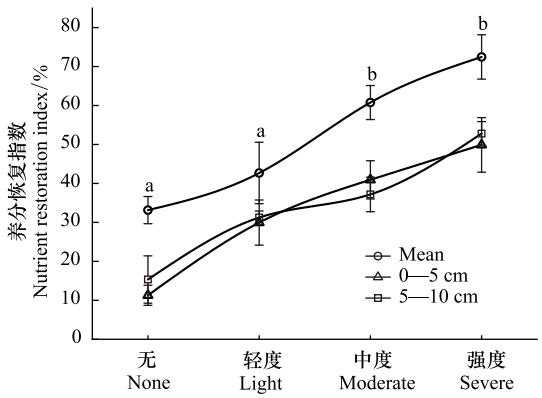

图 4　石漠化等级梯度下苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数

Fig.4　The soil nutrient restoration index of moss crusts under the degree of rocky desertification

不同小写字母表示苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数不同等级石漠化间差异显著($P<0.05$)

3　结论与讨论

3.1　苔藓结皮覆被对石漠化土壤养分的影响

苔藓结皮是退化或受损生态系统的重要地表覆被物,在影响结皮覆被下土壤物理、化学及生物学属性方面起着重要作用[7]。本研究表明石漠化地区苔藓结皮覆被显著增加土壤全量和速效养分含量,且高于黄土高原[22]、毛乌素沙地[25]、腾格里沙漠[26]和古尔班通古特沙漠[27]等地苔藓结皮覆被下土壤养分含量。但苔藓结皮覆被土壤养分含量低于石漠化地区刺梨、花椒等经济林根区土壤[28-30],这可能是因为维管束植物根系分

泌物介导的根际效应改善土壤肥力和土壤元素的生物有效性[31-32],而苔藓植物缺乏真正意义上的根,使得其对土壤肥力的改善程度不及维管束植物。尽管苔藓结皮覆被能改善土壤养分状况已成共识,但其影响途径及机理尚不明确。有学者认为苔藓结皮的毛细孔隙结构和粗糙的表面特性使其具有较强的捕获能力,可有效聚集凋落物和大气沉降养分,从而使得苔藓结皮覆被下土壤养分累积[33-34]。也有学者从土壤生物学特性进行解释,刘润等人通过对土壤的填埋试验表明,苔藓覆被可显著提高石漠化地区土壤脱氢酶、脲酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性[35]。土壤酶是土壤生态系统过程的重要参与者,其作为催化剂在养分矿化和有机质分解中起着至关重要的作用[36]。土壤酶活性的增强直接或间接地表明了苔藓覆盖促进土壤微生物的生长与迁居,增加土壤有机质和养分供应能力。此外,分子测序研究也表明石质生物结皮中微生物群落结构与裸土差异明显,石质结皮中细菌丰富度显著高于裸土[37]。蓝细菌门是石质生物结皮微生物群落结构和功能的驱动者[38-39],其门下大多数成员(如 *Trichocoleus* 和 *Chroococcidiopsis* 属)具有固氮和/或光合固碳功能[40]。因此,石质生物结皮中丰度较高的蓝细菌可能驱动着结皮覆被下土壤碳氮等养分元素的累积,而这有待于进一步研究证实。

3.2 苔藓结皮覆被对石漠化土壤生态化学计量特征的影响

C、N、P、K 化学计量比是衡量土壤有机构成和元素平衡的重要指标,可有效反映土壤供肥能力和质量状况[21]。土壤 C/N 可以衡量土壤 C、N 营养元素平衡状况,是反映土壤有机质矿化速率的敏感性指标。土壤 C/N 与有机质分解速率成反比,较低的 C/N 表明土壤有机质具有较快的分解和矿化作用[41]。本研究中苔藓结皮覆被土壤和裸土 C/N 的平均值分别为 8.43 和 7.41,均低于全国平均水平(11.9)和全球平均水平(14.3)[42]。同时,石漠化地区苔藓结皮覆被土壤 C/N 低于我国西北沙漠化地区和黄土高原地区[22],表明位于亚热带季风气候带的西南石漠化地区的降水量和积温量较高,使得土壤有机质矿化速率较快。但苔藓结皮覆被土壤 C/N 显著高于石漠化裸土,表明苔藓结皮的发育可一定程度上减缓石漠化地区土壤较快的矿化速率,促进土壤有机质的累积。

土壤 N、P 作为陆地生态系统的限制性元素,对植物生长发育具有重要意义,其比值可用于预测养分限制的类型和阈值[43]。一般认为,土壤 N、P 限制植物生长的 N/P 阈值为 14 和 16,比值小于 14 表明 N 限制植物生长,比值大于 16 表明 P 限制植物生长,比值在 14—16 时表明 N 和 P 共同限制植物生长[28]。但也有学者认为,土壤并不是植物所需养分的唯一来源,植物还能在其叶片衰老和凋落前对养分进行重吸收[44],因此,土壤 N/P 可能并不能很好地反映植物生长的养分限制状况。本研究中苔藓结皮覆被土壤和裸土 N/P 的平均值分别为 3.43 和 3.88,表明研究区植物生长受 N 元素限制。相比于无结皮覆被的裸土,苔藓结皮覆被土壤较低的 N/P 并不意味着苔藓结皮加剧了石漠化地区土壤 N 元素限制程度。张楷燕等人研究表明石漠化地区苔藓植物对石灰岩有明显的酶促溶蚀驱动作用[45],苔藓结皮的毛细孔隙结构和粗糙表面特性有利于大量累积岩溶作用产物[46],增加土壤 P 元素含量。土壤 TN 的主要来源是凋落物合成的有机质[47],石漠化地区凋落物的大幅减少使得苔藓结皮对土壤 N 元素的累积量远低于 P 元素,从而导致结皮覆被土壤 N/P 的相对降低。此外,苔藓结皮的覆被可显著增加土壤微生物数量和活性[48],微生物对有机质的分解也使得苔藓结皮覆被下土壤 N 素释放增多,导致土壤 N/P 的降低。

土壤 C/P 是衡量土壤 P 元素有效性的重要指标,较低的 C/P 指示土壤 P 元素有效性较高[19]。研究区苔藓结皮覆被土壤和裸土 C/P 远低于全国平均水平(61)和全球平均水平(186)[42],表明石漠化地区土壤 P 元素表现为净矿化,P 有效性较高。本研究较低的 C/P 和 N/P 表明石漠化地区土壤养分呈现缺 N 富 P 的格局,印证了同一研究区喻阳华等人对花椒人工林养分格局的研究结果[30]。相较于土壤 C、N、P 化学计量比的研究,关于土壤 K 元素的研究较少。本研究发现苔藓结皮覆被土壤 C/K、P/K 显著高于裸土,推测原因为营养元素的来源及稳定性差异导致苔藓结皮对土壤 C 和 P 元素的累积量高于 K 元素,从而使苔藓结皮覆被土壤 C/K 和 P/K 相对增加。本研究苔藓结皮覆被土壤 SOC、TP 和 TK 含量较裸土分别增加 46.08%、53.62%和 20.25%的结果与这一推测吻合,为运用生态化学计量学的方法分析苔藓结皮覆被对土壤养分的贡献提供支撑。

3.3　苔藓结皮在石漠化地区生态修复中的作用

土壤养分恢复指数可以指示生态修复措施对退化土壤养分的恢复程度[22]。通过分析苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数发现,苔藓结皮的覆盖可以较大程度地加速石漠化地区土壤养分恢复进程,这与维管束植物促进土壤 C、N、P 等养分的累积类似。高丽倩等人在黄土高原地区的研究表明土壤养分恢复指数随生物结皮演替显著增加,演替后期土壤养分恢复指数高达 227%[22],远高于本研究中苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数。我们推测由研究对照及研究区气候特征的差异所导致。其一,高丽倩等人选择坡耕地作为对照,而本研究对照为各等级石漠化生境下无结皮覆被的裸土,裸土养分状况自身因石漠化等级不同而有所差异。其二,西南石漠化地区较好的水热条件使得本区域土壤养分背景值高于黄土高原地区,因而苔藓结皮覆被对土壤养分的累积和改善程度低于黄土高原地区。此外,本研究表明苔藓结皮对土壤养分的改善程度与石漠化等级相关,土壤养分恢复指数呈现随石漠化等级升高而增加的趋势,中强度石漠化阶段苔藓结皮覆被土壤养分恢复指数显著高于无石漠化和轻度石漠化阶段。原因为石漠化早期植被凋落物输入尚未大幅减少,水土流失尚不强烈,土壤养分仍处于较良好的状况,而当退化到中强度石漠化阶段,植被覆盖极低,有机物输入的匮乏和土壤养分的流失导致土壤质量急剧恶化。因此,在中强度石漠化生境中,苔藓结皮对土壤养分的累积和改善程度更为可观,能更大程度地促进土壤养分恢复进程。

石漠化地区基岩裸露,植被稀疏,水土流失强烈,生态系统脆弱[1]。严酷的石漠化生境极大地制约着此地区植被生长发育和生态系统恢复。苔藓植物特殊的形态结构和生理生态机制使其在石漠化生态系统中占据着重要的生态位。综合苔藓结皮对石漠化土壤养分及生态化学计量特征的影响发现,苔藓结皮的覆被可有效促进土壤养分的累积,加速石漠化地区土壤养分恢复进程。顶坛花椒(*Zanthoxylum planispinum var. dintanensis*)是研究区生态恢复和经济建设的优势经济林木,但近年来出现大面积生长衰退现象,严重制约石漠化地区的植被恢复和建设[30]。当前顶坛花椒人工林存在凋落物数量少、分解快,林分结构单一,系统稳定性差等弊端。基于苔藓结皮在石漠化地区的生态效益,可考虑花椒林下配置苔藓结皮,提高花椒林分稳定性和增强土壤肥力。因此,建议结合不同等级石漠化生境条件,将苔藓结皮作为一种补充手段联合其它生态恢复措施促进石漠化受损生态系统结构和功能提升,推动石漠化地区的生态恢复与重建。

参考文献(References):

[1] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in southwest China: impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[2] 王涵, 刘琦, 任标, 姚邦杰, 廖启迪. 典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 6-12.

[3] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, Shi D M, Li C L. The role of soil water retention functions of near-surface fissures with different vegetation types in a rocky desertification area. Plant and Soil, 2019, 441(1/2): 587-599.

[4] 苏俊磊, 罗为群, 谷佳慧, 王广哲, 周永华, 黄静. 岩溶峰丛洼地水土漏失过程、机理及综合防治研究进展. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(2): 16-22.

[5] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(18): 6580-6593.

[6] 周忠发, 朱昌丽, 谭玮颐, 陈全, 冯倩. 基于空间开发适宜性评价的石漠化地区可持续发展研究——以贵州省盘州市为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(1): 1-9.

[7] Weber B, Büdel B, Belnap J. Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands. Berlin: Springer, 2016: 3-13.

[8] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 张宝军, 杨寒月. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 42-48.

[9] 何芳兰, 郭春秀, 吴昊, 刘左军, 徐文, 金红喜. 民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6064-6073.

[10] 王彦峰, 肖波, 王兵, 马爽, 姚小萌. 黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮对土壤酶活性的影响. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3553-3561.

[11] Song G, Li X R, Hui R. Biological soil crusts increase stability and invasion resistance of desert revegetation communities in northern China. Ecosphere, 2020, 11(2): e03043.

[12] de Carvalho R C, dos Santos P, Branquinho C. Production of moss-dominated biocrusts to enhance the stability and function of the margins of

artificial water bodies. Restoration Ecology, 2018, 26(3): 419-421.

[13] Yang Y S, Zhang L, Chen X F, Wang W, Bu C F, Li Y N, Zhou H K. Effects of chemical substances on the rapid cultivation of moss crusts in a phytotron from the Loess Plateau, China. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21(3): 268-278.

[14] Bu C F, Li R X, Wang C, Bowker M A. Successful field cultivation of moss biocrusts on disturbed soil surfaces in the short term. Plant and Soil, 2018, 429(1-2): 227-240.

[15] Kheirfam H, Roohi M. Accelerating the formation of biological soil crusts in the newly dried-up lakebeds using the inoculation-based technique. Science of the Total Environment, 2020, 706: 136036.

[16] Deng S Q, Zhang D Y, Wang G H, Zhou X J, Ye C R, Fu T R, Ke T, Zhang Y R, Liu Y D, Chen L Z. Biological soil crust succession in deserts through a 59-year-long case study in China: how induced biological soil crust strategy accelerates desertification reversal from decades to years. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 141: 107665.

[17] 程才, 李玉杰, 龙明忠, 李晓娜. 苔藓结皮在我国喀斯特石漠化治理中的应用潜力. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2501-2510.

[18] 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.

[19] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602.

[20] 张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.

[21] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 杜海伦, 张雄清, 郭文福, 孙建军. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(4): 1207-1218.

[22] 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.

[23] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002: 134-137.

[24] Hu P L, Zhang W, Xiao L M, Yang R, Xiao D, Zhao J, Wang W L, Chen H S, Wang K L. Moss-dominated biological soil crusts modulate soil nitrogen following vegetation restoration in a subtropical karst region. Geoderma, 2019, 352: 70-79.

[25] 董金伟, 李宜坪, 李新凯, 李炳垠, 郭琦, 卜崇峰. 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. 水土保持研究, 2019, 26(2): 112-117.

[26] 都军, 李宜轩, 杨晓霞, 李云飞, 马晓俊. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响. 中国沙漠, 2018, 38(1): 111-116.

[27] 李茜倩, 张元明. 荒漠藓类结皮边缘效应下土壤肥力的灰色关联度分析. 中国沙漠, 2019, 39(3): 17-24.

[28] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 秦仕忆. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(15): 5393-5403.

[29] 李朝婵, 李婕羚, 全文选, 黄先飞, 唐凤华, 顾云兵. 喀斯特地区无籽刺梨产地土壤理化特征与评价. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2018, 36(5): 12-15, 23-23.

[30] 喻阳华, 钟欣平, 李红. 黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒人工林生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15): 5536-5545.

[31] 王会会, 李前正, 王川, 周巧红, 吴振斌. 根系分泌物介导的根际效应及在水体生态修复中的应用潜力. 水生生物学报, 2020, 44(2): 453-460.

[32] 李菲, 刘杰, 张习敏, 何小红, 乙引. 喀斯特适生植物的共生微生物的研究进展. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 1-5, 29-29.

[33] 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.

[34] 王国鹏, 肖波, 李胜龙, 孙福海, 姚小萌. 黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3050-3056.

[35] 刘润, 申家琛, 张朝晖. 4 种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义. 水土保持学报, 2018, 32(6): 141-148.

[36] 马伟伟, 王丽霞, 李娜, 郑东辉, 谢路路, 刘庆, 尹春英. 不同水氮水平对川西亚高山林地土壤酶活性的影响. 生态学报, 2019, 39(19): 7218-7228.

[37] Makhalanyane T P, Valverde A, Birkeland N K, Cary S C, Tuffin M I, Cowan D A. Evidence for successional development in Antarctic hypolithic bacterial communities. The ISME Journal, 2013, 7(11): 2080-2090.

[38] Valverde A, Makhalanyane T P, Seely M, Cowan D A. Cyanobacteria drive community composition and functionality in rock - soil interface communities. Molecular Ecology, 2015, 24(4): 812-821.

[39] 贾丽娟, 唐凯, 兰慧青, 徐黄纬, 国情文, 丁悦, 谭芳, 邢丽华, 郭雨晴, 冯福应. 中央戈壁石下生物土壤结皮中细菌群落结构和多样性. 微生物学通报, 2018, 45(12): 2603-2613.

[40] Christian K, Kaestli M, Gibb K. Spatial patterns of hypolithic cyanobacterial diversity in Northern Australia. Ecology and Evolution, 2017, 7(17): 7023-7033.

[41] 邓成华, 吴龙龙, 张雨婷, 乔航, 刘兴元, 胡亚军, 陈香碧, 苏以荣, 何寻阳. 不同林龄油茶人工林土壤-叶片碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(24): 9152-9161.

[42] 宋一凡, 卢亚静, 刘铁军, 刘慧文, 闫泽宇, 王慧琪. 荒漠草原不同雨量带土壤-植物-微生物 C、N、P 及其化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(12): 4011-4023.

[43] 勒佳佳, 苏原, 罗艳, 耿凤展, 朱玉梅, 李凯辉, 刘学军. 围封对天山高寒草原 4 种植物叶片和土壤化学计量学特征的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1621-1628.

[44] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, Novais R F, Jackson R B. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants. Ecological Monographs, 2012, 82(2): 205-220.

[45] 张楷燕, 李同建, 张显强, 孙敏. 3 种石生苔藓植物碳酸酐酶对石灰岩的溶蚀作用. 中国岩溶, 2017, 36(4): 441-446.

[46] García-Carmona M, Arcenegui V, García-Orenes F, Mataix-Solera J. The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110287.

[47] 李路, 常亚鹏, 许仲林. 天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化. 生态学报, 2018, 38(22): 8139-8148.

[48] Xiao B, Veste M. Moss-dominated biocrusts increase soil microbial abundance and community diversity and improve soil fertility in semi-arid climates on the Loess Plateau of China. Applied Soil Ecology, 2017, 117-118: 165-177.