

侵蚀条件下生物结皮对坡面土壤碳氮的影响

孟杰¹, 卜崇峰^{1,2†}, 李莉¹, 张兴昌^{1,2}, 孙占锋³, 张小军¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌;
3. 《中国水土保持》杂志社, 450003 郑州)

摘要 为了探讨侵蚀条件下生物结皮对坡面土壤碳氮的影响, 通过野外小区对比试验与室内分析相结合, 研究有、无生物结皮坡面土壤有机质、全氮、硝态氮和铵态氮的分布特征。结果表明: 生物结皮对坡面土壤碳氮积累具有重要意义, 同一坡位下, 土壤有机质、全氮和硝态氮含量在 0~20 cm 剖面上均明显表现为生物结皮大于无结皮。总体来看, 生物结皮对土壤碳氮的影响主要集中在 0~10 cm 土层, 与无结皮相比, 土壤有机质、全氮、硝态氮和铵态氮平均储量分别增加了 44.7%、18.2%、39.2% 和 4.33%。生物结皮能显著增加 0~2 和 2~5 cm 土壤硝态氮含量 ($P < 0.05$), 这除了生物结皮对土壤养分的保蓄效应外, 还可能与生物结皮向土壤释放硝态氮有关。由于铵态氮流失特征不同于硝态氮, 加之生物结皮可能会利用或释放铵态氮, 使生物结皮对其影响表现出无明显规律性。相关分析表明, 土壤有机质与全氮、硝态氮和铵态氮均达到了极显著或显著的正相关关系 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)。综上所述, 侵蚀环境下生物结皮发挥着重要的固土蓄肥功能, 这对研究区退化生态系统的恢复和重建具有积极的意义。
关键词 生物结皮; 有机质; 土壤氮素; 土壤侵蚀; 坡位; 黄土高原

Effects of biological soil crust on slope soil carbon and nitrogen under erosion conditions

Meng Jie¹, Bu Chongfeng^{1,2}, Li Li¹, Zhang Xingchang^{1,2}, Sun Zhanfeng³, Zhang Xiaojun¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, 712100, Yangling, Shaanxi;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi;
3. Soil and Water Conservation in China Press, 450003, Zhengzhou, China)

Abstract In order to reveal the effects of biological soil crust (BSC) on the distribution of soil carbon and nitrogen on slope under erosion conditions, by experimenting on field plots and in laboratory, this study investigated the distribution pattern of soil organic matter, total nitrogen and nitrate nitrogen contents with BSC treatment and without crust group. The results indicated that: biological soil crust played significant role in soil carbon and nitrogen accumulation. In the same position on slope, soil organic matter, total nitrogen and nitrate nitrogen contents of BSC treatment in soil profile of 0–20 cm depth were higher than those without crust group. On the whole, the accumulation effect of BSC on soil carbon and nitrogen was mainly concentrated in the 0–10 cm soil layer. Compared with no crust, the average storages of soil organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were increased by 44.7%, 18.2%, 39.2% and 4.33%, respectively. BSC could significantly increase soil nitrate nitrogen content of 0–2 cm and 2–5 cm soil layers ($P < 0.05$), which may be explained by that BSC could

收稿日期: 2010-10-16 修回日期: 2011-03-11

项目名称: 国家自然科学基金项目“黄土水蚀风蚀交错区土壤结皮的时空发育特征及其土壤水文与侵蚀效应研究”(40701096); 中国科学院西部之光项目“毛乌素沙地生物结皮的发育过程及其风蚀效应研究”(B28013200); 陕西省自然科学基金项目“黄土风水蚀交错区土壤结皮的发育及其侵蚀效应”(SJ08D07)

第一作者简介: 孟杰(1985—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 水土保持与恢复生态学。E-mail: mengjie2008@nwsuaf.edu.cn

† 责任作者简介: 卜崇峰(1977—)男, 博士, 副研究员。主要研究方向: 水土保持与土壤侵蚀。E-mail: buchongfeng@163.com

control nitrate nitrogen loss by effectively reducing soil erosion and also release some amount of nitrate nitrogen during the studying period. Due to the loss characteristics of soil ammonium nitrogen were different from nitrate nitrogen, the effect of BSC on soil ammonium nitrogen was not obvious. Correlation analysis showed that there were highly significant or significant positive correlations between soil organic matter and total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen (respectively $P < 0.01$, $P < 0.05$). Therefore, it can be concluded that the presence of biological soil crust would have favorable effects on soil carbon and nitrogen accumulation under erosion conditions, which indicate BSC could be of great positive significance to restoration and reconstruction of degraded ecosystem in research area.

Key words biological soil crust; soil organic matter; soil nitrogen; soil erosion; slope; Loess Plateau

干旱缺水与水土流失是我国黄土高原地区面临的最为突出的生态环境问题,严重影响和制约了当地经济和社会的可持续发展。受地理位置和气候的影响,黄土高原北部水蚀风蚀交错带($E 103^{\circ}33' \sim 113^{\circ}53'$, $N35^{\circ}20' \sim 40^{\circ}10'$)是黄土高原土壤侵蚀最为剧烈的地区^[1],也是黄河下游河道泥沙的主要源区,一直以来是国家开展生态环境综合整治的重点和难点区域。水土流失不仅加剧了水资源供需矛盾、造成土壤质量退化和土地生产力下降,而且会引起土壤养分的运移、分布和流失,进而造成环境恶化及农业面源污染。土壤侵蚀伴随着土壤养分的流失,影响土壤侵蚀的因素也就构成了土壤养分流失的主要因素,如降雨特征、土壤性质、地表状况和土地利用方式等^[2]。生物结皮是由土壤微生物、藻类、地衣及苔藓等微小生物组分与表层土壤长期相互作用而形成的复合生物土壤层,具有稳定土壤表面、改善土壤理化性质、提高土壤抗水蚀或风蚀能力等重要生态功能^[3-4]。近年来,我国黄土高原地区生物结皮的研究逐步引起了广大学者的重视,并取得了诸多成果,主要涉及生物结皮特征及其对土壤理化性质的影响^[5-8]、对土壤水分入渗的影响^[9-10]、生物结皮的抗冲性^[11-12]、分布特征及其影响因素^[13-15],以及生物结皮的人工培育技术及其水土保持效应等^[16]。生物结皮作为黄土高原坡地的典型地表覆被物,一方面结皮组成生物会通过固碳、固氮作用增加土壤养分,另一方面生物结皮通过减少土壤侵蚀,对土壤养分起保蓄作用;因此,探讨侵蚀条件下生物结皮对坡面土壤养分分布特征的影响,对认识结皮的生态功能和开展生态环境治理具有重要的理论和实践意义。因此,笔者以水蚀风蚀交错区六道沟小流域自然条件下发育的生物结皮为对象,通过野外小区对比试验,分析有、无生物结皮坡面土壤侵蚀状况和土壤碳氮的分布特征,旨在明确该区生物结皮的生态功能,为保护和利用生物结皮资源

提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省神木县以西 14 km 处的六道沟小流域($E 110^{\circ}21' \sim 110^{\circ}23'$, $N 38^{\circ}46' \sim 38^{\circ}51'$)海拔 1 081 ~ 1 274 m,流域面积 6.89 km²,主沟道长 4.21 km。流域北依长城,地处毛乌素沙漠边缘,南靠黄土丘陵区,地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区,属于中温带半干旱气候,年均气温 7 ~ 9 °C,盛行风向为西北风,年平均风速 2.2 m/s;多年平均降雨量 400 mm 左右,且年内、年际变化较大,其中 6—9 月份的降雨量占全年降雨量的 70% ~ 80%^[1]。该区土壤侵蚀全年进行,平均水蚀模数 15 000 t/(km²·a),其中 7—8 月水蚀量占全年的 93.41%,平均风蚀模数 3 200 t/(km²·a),其中 4—5 月风蚀量占全年的 96.49%^[17]。流域内主要土壤类型分为 4 个土类,分别为黄土正常新成土、红色正常新成土、干润砂质新成土和淤积人为新成土。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,主要为苜蓿(*Medicago sativa*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;农作物主要有谷子(*Setaria italica*)、玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)和大豆(*Glycine max*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验小区设置 在流域内选择一坡面($E 110^{\circ}21'46.2''$, $N 38^{\circ}47'39.9''$,海拔 1 196 m)修建径流小区,大小为 4 m × 2 m,坡向北偏东,坡度为 15°,各小区的大小、坡向、坡度相同。试验设置 2 个处理,分别为生物结皮处理和无结皮(裸地)处理,各处理 2 次重复,共计 4 个小区。其中生物结皮处理为采集流域内自然发育较好的生物结皮铺设而成,采集过程中尽量保持生物结皮的完整性,铺设时用铁耙将土壤表面耙平耙细,以使结皮更好地与下

伏土壤表面接触,布设时间为2008年7月。生物结皮类型为苔藓结皮,以真藓(*Bryum argenteum* Hedw.)、尖叶对齿藓(*Didymodon constrictus* (Mitt.) Saito)和狭网真藓(*Bryum algovicum* Sendt.)为优势藓种,其发育特征如表1所示。供试土壤为黄绵土(黄土正常新成土),质地为砂质壤土,其黏粒的质量分数为6.3%,粉粒22.1%,砂粒71.6%,土壤pH值为8.5左右。在各小区底部安装径流桶,用于天然降雨侵蚀泥沙和地表径流的收集观测,选取2009年的观测数据进行分析探讨。

1.2.2 土样采集与分析 于2009年10月(距小区布设已有436d)在每个小区的上坡位和下坡位分别进行0~20 cm(生物结皮小区不含结皮层)土壤

样品采集,以0~2, 2~5, 5~10, 10~15和15~20 cm分层,同一坡位多点取样,同层土壤混匀作为分析样。将土壤样品运回实验室,风干后除去肉眼可见的碎石、植物残体等杂质,磨细过筛(1和0.25 mm),装入磨口玻璃瓶中备用。土壤有机质(SOM)用重铬酸钾容量法—外加加热法,速效磷(AP)采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法,速效钾(AK)采用NH₄OAc浸提—火焰光度法测定^[18],土壤全氮(TN)采用KDY-9830全自动凯氏定氮仪测定,硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)采用1 mol/L KCl浸提—AA3连续流动分析仪测定,pH值采用精密酸度计测定(水土质量比为1:1)。所有分析指标测定时取3个平行,结果以风干土为基准进行计算。

表1 生物结皮的基本特征

Tab.1 Basic properties of biological soil crust

| 指标 | 厚度 ^a mm | 抗剪强度 ^b kPa | 有机质 g·kg ⁻¹ | 全氮 g·kg ⁻¹ | 硝态氮 mg·kg ⁻¹ | 铵态氮 mg·kg ⁻¹ | 速效磷 mg·kg ⁻¹ | 速效钾 mg·kg ⁻¹ | pH值 |
|-----|-----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| 结皮层 | 10.2 ± 1.9 | 36.2 ± 7.3 | 18.75 ± 1.08 | 0.80 ± 0.08 | 1.12 ± 0.23 | 17.19 ± 2.51 | 6.21 ± 0.82 | 102.03 ± 26.07 | 8.07 ± 0.06 |

注: a 游标卡尺测定; b 袖珍剪力测量仪(BWT2XZJL)测定。

1.2.3 数据处理与分析

土壤养分储量(*S*)是指单位面积一定深度土壤养分的净含量,用g/m²或mg/m²表示,计算式为

$$S = \sum_{i=1}^n 10BH_iC_i$$

式中:*B*为土壤密度,g/cm³,取1.35计算;*H_i*为第*i*层的土壤深度,cm;*C_i*为第*i*层的土壤养分含量,g/kg或mg/kg;*n*为土壤的层数。

用SAS8.0软件进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对坡面水土流失的影响

大量研究^[12,16,19-20]显示,生物结皮可通过结皮生物体(如菌丝体、藻丝体和苔藓假根等)及其分泌物将松散土粒紧密地缠绕和黏结在一起,并以自身的代谢方式改变土壤结构,提高土壤抗蚀性,因此,表现出显著地减少风蚀或水蚀效应。苔藓结皮是发育最为完善的生物结皮,其生物量较大,因此抗冲刷、抗侵蚀能力最强^[12]。在本研究中,有、无结皮小区均以面蚀为主,无明显细沟侵蚀现象,从观测的数据来看,无结皮处理年侵蚀泥沙总量平均为134.1 t/km²,是生物结皮处理的16.2倍;而有无结皮之间径流总量差异不明显(图1)。已有研究^[12]发现,在坡度和冲刷强度相同的条件下,无结皮土壤径流含

沙量是全覆盖结皮土壤的35倍。由此可见,生物结皮能显著减少土壤侵蚀;然而,土壤侵蚀与土壤养分流失关系密不可分,在坡地土地利用方式下,侵蚀泥沙是土壤养分流失的主要载体^[2]。1977年,E. F. Kleiner等^[21]就已经提出生物结皮对土壤养分的影响主要是通过降低土壤侵蚀实现的,因此,研究侵蚀环境下生物结皮对坡面土壤养分的影响具有十分重要的意义。

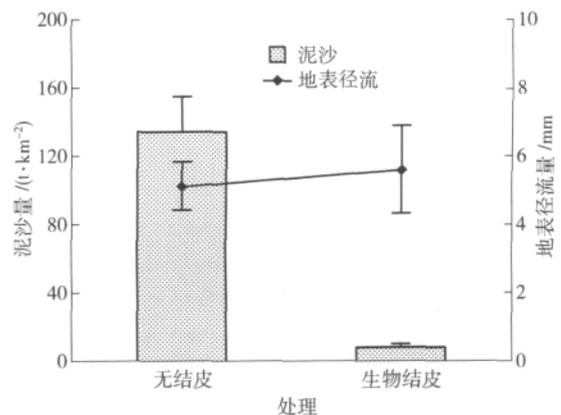


图1 无结皮和生物结皮处理的泥沙量和地表径流量

Fig.1 Sediment yield and runoff of plots with and without biological soil crust

2.2 生物结皮对土壤碳氮的影响

生物结皮对土壤养分的积累主要是其固定效应和保蓄效应综合作用的结果,其形成和发育对土壤

养分尤其是土壤碳氮贡献最大^[22]。已有研究^[23]显示,对于以藓类植物为主要生物组成的苔藓结皮,由于苔藓植物本身不具有固氮能力,其固氮活性主要是由生活在苔藓假根周围的少量固氮蓝藻完成。

2.2.1 对土壤有机质质量分数的影响 图2显示,无论有无生物结皮,土壤有机质质量分数在0~20 cm剖面上呈现逐渐递减趋势,其中以无结皮处理下坡位递减趋势最为明显,从4.57 g/kg下降至1.95 g/kg;无论有无生物结皮,上坡位土壤有机质质量分数明显高于下坡位。对于相同坡位下,土壤有机质质量分数均表现为生物结皮>无结皮,其中下坡位有无结皮之间的差异最大,而且随剖面深度的增加差异越明显,原因是下坡位土壤侵蚀强烈,生物结皮能够更好地发挥其对土壤养分的保蓄作用,这意味着生物结皮对下坡位土壤有机质的积累具有更重要的意义。在不考虑坡位的前提下,对侵蚀环境下土壤有机质在有无生物结皮之间的差异进行分析(表2)结果表明2~5和5~10 cm土壤有无生物结皮之间差异均达到显著水平($P < 0.05$),而表层0~2 cm土壤未达到显著水平($P > 0.05$),其原因可能是由于裸地在试验期末未受经常性干扰,试验后期地表已出现了浅灰黑色的藻类结皮雏形(无明显层次结构),加之裸地地表接受一定的大气降尘,会对本试验结果产生一定影响。

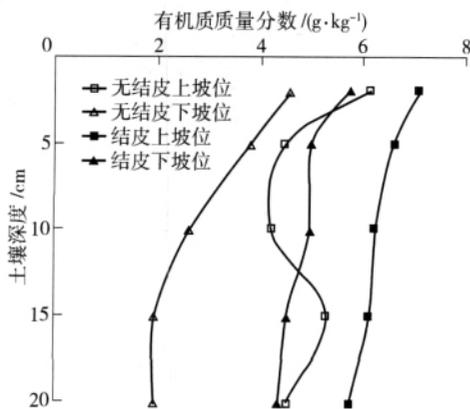


图2 生物结皮对坡面土壤有机质质量分数的影响

Fig.2 Effects of biological soil crust on slope soil organic matter

2.2.2 对土壤全氮质量分数的影响 图3示出有无生物结皮下坡面土壤全氮的变化特征。总体来看,无论有无生物结皮,土壤全氮质量分数随土壤深度的增加呈减少趋势;但减少幅度不同,其中有生物结皮时,上坡位和下坡位土壤全氮质量分数在5 cm以下减少幅度较小,而无结皮处理下坡位减幅较大,从0.39 g/kg下降至0.23 g/kg,这与土壤有机质分

布规律相似。无论有无生物结皮,上坡位土壤全氮质量分数高于下坡位;在相同坡位下,土壤全氮质量分数都表现为:生物结皮>无结皮。从表2可知:2~5和5~10 cm土壤有无生物结皮之间全氮含量差异均达到显著水平($P < 0.05$),而表层0~2 cm土壤则未达到显著水平($P > 0.05$),同前文土壤有机质的影响分析一致。

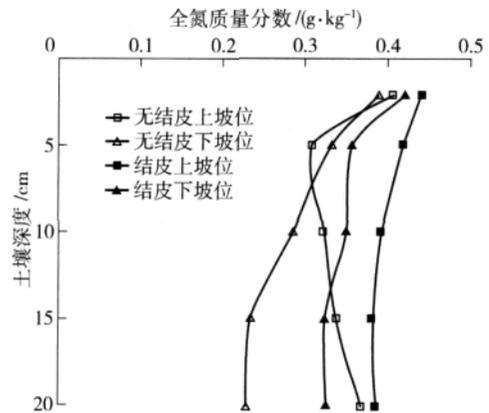


图3 生物结皮对坡面土壤全氮质量分数的影响

Fig.3 Effects of biological soil crust on slope soil total nitrogen

2.2.3 对土壤硝态氮和铵态氮质量分数的影响 从土壤氮素形态分布来看,矿质态氮(硝态氮和铵态氮)占土壤全氮的3.1%~3.6%(本文数据计算),其余则以有机氮形式存在。结合图4(a)和表2可知:无论有无生物结皮,土壤硝态氮质量分数在0~20 cm剖面上总体呈现出增加趋势;无论有无生物结皮,土壤硝态氮质量分数都表现为上坡位>下坡位;对于相同坡位下,土壤硝态氮质量分数都表现为生物结皮>无结皮,且上坡位下二者差异最大,说明上坡位生物结皮有利于土壤硝态氮的积累。肖波等^[22]在该区开展了人工培育生物结皮下土壤养分积累效应研究,发现生物结皮并没有增加硝态氮随径流的流失的风险,并且提出生物结皮表层较高的土壤养分含量可能导致泥沙养分流失强度加剧,与无结皮相比,经过2年的培育生物结皮可减少土壤侵蚀约24%。然而,从本研究结果来看,自然发育的生物结皮控蚀能力明显高于初期的人工结皮,这就意味着其对土壤养分保蓄作用也就越大;因此,生物结皮下硝态氮质量分数明显高于无结皮。对生物结皮下不同坡位之间,上坡位硝态氮质量分数明显高于下坡位,这与下坡位径流冲刷强度较大以及硝态氮易随径流运移流失有关。从表2可以看出,与无结皮相比,生物结皮下0~2和2~5 cm土壤硝态氮质量分数均显著增加($P < 0.05$)。这除了生物结皮对土壤养分的保蓄作用外,还可能与生物结皮向

土壤释放硝态氮有关^[24],同时由于硝态氮在黄绵土(砂质壤土)中易发生迁移淋洗^[25],土壤硝态氮质量分数随剖面土壤深度增加而表现出增加趋势(图 4(a))。

土壤铵态氮是土壤矿质态氮的主要形式,占 90% 左右。在 0~20 cm 剖面上,无论有无生物结皮,土壤铵态氮质量分数总体呈现出波动递减趋势(图 4(b));无论有无生物结皮,上坡位土壤铵态氮质量分数大于下坡位;对于相同坡位,整体来看有无结皮之间的差异无明显规律。从表 2 可知,生物结皮下 0~2 cm 土壤铵态氮质量分数与无结皮之间差异不显著($P > 0.05$),然而 2~5 cm 土壤有无结皮间差异显著($P < 0.05$)。究其原因:对于无结皮处

理,试验初期由于强烈侵蚀而造成养分流失,但后期地表藻类结皮雏形可能会因土壤藻类的固氮作用使地表氮素增加;而对于生物结皮处理来讲,试验期间结皮通过减蚀效应保护土壤养分,同时也因快速生长可能吸收利用较多的铵态氮。W. Beyschlag 等^[24]研究发现,室内人工培养灰色念珠藻(*Nostoc muscorum*)结皮在前 1~4 周吸收了较多的铵态氮用于自身建成,而硝态氮与未接种处理相比变化不明显,之后结皮处理表现为不同程度地释放铵态氮和硝态氮,并认为结皮氮素的释放与结皮生长发育阶段有关。关于研究区苔藓结皮发育中可利用氮源形态、及其向土壤吸收或释放氮素的机制是否同上述藻类结皮相似等问题都是今后研究的重要内容。

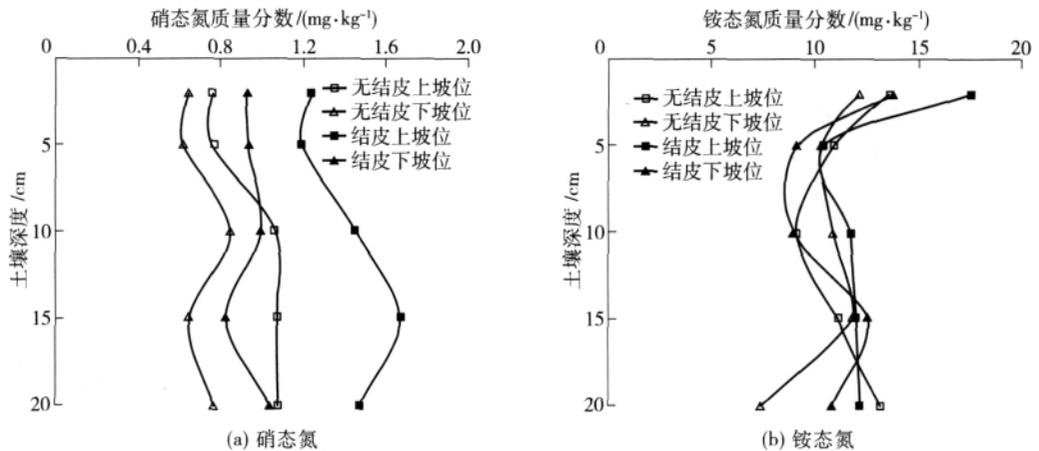


图 4 生物结皮对坡面土壤硝态氮和铵态氮质量分数的影响

Fig. 4 Effects of biological soil crust on slope soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen

表 2 生物结皮对 0~20 cm 剖面土壤养分质量分数的影响

Tab. 2 Effects of biological soil crust on soil nutrients in 0~20 cm profile

| 土壤深度/cm | 处理 | 有机质/(g·kg ⁻¹) | 全氮/(g·kg ⁻¹) | 硝态氮/(mg·kg ⁻¹) | 铵态氮/(mg·kg ⁻¹) |
|---------|------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0~2 | 无结皮 | 5.35 ± 0.45a | 0.40 ± 0.02a | 0.70 ± 0.04a | 13.04 ± 1.91a |
| | 生物结皮 | 6.42 ± 0.39a | 0.43 ± 0.02a | 1.08 ± 0.13b | 15.60 ± 1.27a |
| 2~5 | 无结皮 | 4.15 ± 0.27a | 0.32 ± 0.01a | 0.69 ± 0.06a | 10.69 ± 0.28a |
| | 生物结皮 | 5.79 ± 0.48b | 0.39 ± 0.03b | 1.07 ± 0.14b | 9.51 ± 0.44b |
| 5~10 | 无结皮 | 3.42 ± 0.47a | 0.30 ± 0.01a | 0.96 ± 0.13a | 9.96 ± 0.73a |
| | 生物结皮 | 5.60 ± 0.40b | 0.37 ± 0.03b | 1.22 ± 0.23a | 10.29 ± 0.99a |
| 10~15 | 无结皮 | 3.64 ± 0.99a | 0.29 ± 0.03a | 0.86 ± 0.14a | 11.31 ± 0.84a |
| | 生物结皮 | 5.33 ± 0.49a | 0.35 ± 0.02a | 1.25 ± 0.35a | 12.20 ± 1.23a |
| 15~20 | 无结皮 | 3.24 ± 0.77a | 0.30 ± 0.04a | 0.92 ± 0.09a | 11.20 ± 2.35a |
| | 生物结皮 | 5.04 ± 0.41b | 0.36 ± 0.02a | 1.25 ± 0.14a | 11.52 ± 1.10a |

注:表中数据为平均值 ± 标准误;同层土壤有无生物结皮之间差异显著性用 t 检验(单尾 $P < 0.05$) 不同字母表示差异显著,反之不显著。

2.2.4 对土壤碳氮储量的影响 从表 2 可知,侵蚀环境下生物结皮对坡面土壤碳氮质量分数的影响主要发生在 0~10 cm 土壤,为了明确地反映生物结皮的养分积累效应,对有无生物结皮下 0~10 cm 土壤碳氮储量进行了计算,结果列于表 3。可以看

出:无论有无生物结皮,上坡位土壤碳氮储量大于下坡位(无结皮下铵态氮除外);对相同坡位下,土壤碳氮储量表现为生物结皮大于无结皮(生物结皮下铵态氮除外)。就平均值来看,与无结皮相比,生物结皮下土壤有机质、全氮、硝态氮和铵态氮储量分别

表3 生物结皮对0~10 cm 土壤碳氮储量的影响

Tab.3 Effects of biological soil crust on soil nutrients storage in the 0-10 cm soil layer

| 处理 | 坡位 | 有机质/(g·m ⁻²) | 全氮/(g·m ⁻²) | 硝态氮/(mg·m ⁻²) | 铵态氮/(mg·m ⁻²) |
|------|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 无结皮 | 上坡位 | 631.33 ± 25.42 | 45.47 ± 1.93 | 123.10 ± 2.72 | 1417.64 ± 152.52 |
| | 下坡位 | 455.15 ± 26.80 | 43.27 ± 1.77 | 99.52 ± 18.35 | 1475.96 ± 31.79 |
| | 平均值 | 543.24 | 44.37 | 111.31 | 1446.80 |
| 生物结皮 | 上坡位 | 879.97 ± 39.59 | 55.40 ± 7.59 | 180.04 ± 38.81 | 1677.73 ± 81.08 |
| | 下坡位 | 692.39 ± 5.00 | 49.46 ± 3.48 | 129.92 ± 24.93 | 1341.20 ± 97.17 |
| | 平均值 | 786.18 | 52.43 | 154.98 | 1509.46 |

增加了44.7%、18.2%、39.2%和4.33%。

2.2.5 土壤碳氮指标之间的相关分析 在土壤生态系统中,碳氮之间的关系十分紧密。从表4可知,土壤有机质与全氮有极显著的正相关关系($P < 0.01$),有机质与硝态氮和铵态氮之间也分别达到了极显著正相关($P < 0.01$)和显著正相关($P < 0.05$)。土壤全氮与铵态氮具有显著的正相关关系($P < 0.05$),而与硝态氮无显著的相关关系。土壤铵态氮与硝态氮之间无显著的相关关系。

表4 土壤有机质、全氮、硝态氮和铵态氮之间的 Pearson 相关系数

Tab.4 Pearson correlation coefficients among soil organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen

| | 有机质 | 全氮 | 硝态氮 | 铵态氮 |
|-----|---------|--------|-------|-------|
| 有机质 | 1.000 | | | |
| 全氮 | 0.868** | 1.000 | | |
| 硝态氮 | 0.432** | 0.289 | 1.000 | |
| 铵态氮 | 0.380* | 0.398* | 0.264 | 1.000 |

注: ** 极显著水平 $P < 0.01$; * 显著水平 $P < 0.05$ 。

3 结论

1) 生物结皮能显著减少土壤侵蚀,平均减少量为93.8%,这对坡面土壤碳氮积累具有重要意义。

相同坡位下0~20 cm 剖面土壤有机质和全氮质量分数均表现为生物结皮大于无结皮;除表层0~2 cm 土壤外,2~5 和5~10 cm 土壤有机质和全氮在有无生物结皮之间的差异均达到显著水平($P < 0.05$);与无结皮相比,生物结皮下0~10 cm 土壤有机质和全氮储量分别增加了44.7%和18.2%。

2) 矿质氮(硝态氮和铵态氮)占土壤全氮的3.1%~3.6%。相同坡位下0~20 cm 剖面土壤硝态氮质量分数都表现为生物结皮大于无结皮,而铵态氮质量分数有无结皮之间的差异不明显;生物结皮能显著增加0~2 和2~5 cm 土壤硝态氮质量分

数($P < 0.05$),这除了生物结皮对土壤养分的保蓄效应外,还可能与生物结皮向土壤释放硝态氮有关,由于铵态氮流失特征不同于硝态氮,加之生物结皮可能会利用或释放铵态氮,使生物结皮对其影响表现出无明显规律性;与无结皮相比,生物结皮下0~10 cm 土壤硝态氮和铵态氮储量分别增加了39.2%和4.33%。

3) 土壤有机质与全氮质量分数有极显著的正相关关系($P < 0.01$),与硝态氮和铵态氮之间也分别达到了极显著和显著正相关($P < 0.01$ 和 $P < 0.05$);土壤全氮与铵态氮有显著的正相关关系($P < 0.05$)。

综上所述,侵蚀环境下生物结皮发挥着重要的固土蓄肥功能,这对我国黄土高原生态环境脆弱区的水土流失治理和植被恢复重建具有重要的指导意义。利用生物结皮及其与植被的组合来防治土壤侵蚀和改善生态环境具有潜在的应用价值。本研究是在特定侵蚀条件和结皮类型的基础上进行的,然而生物结皮的发育具有明显的时空异质性,加之缺乏长期的监测资料,所得的结论还有很大的局限性,针对不同研究尺度和生物结皮类型对坡面土壤碳氮的影响还亟待今后深入研究。

生物结皮藓类组成鉴定得到河北师范大学生命科学学院赵建成教授和刘永英副教授的帮助,在此谨致谢忱!

4 参考文献

- [1] 李勉,李占斌,刘普灵,等.黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征[J].水土保持学报,2004,18(1):63-65
- [2] 李俊波,华珞,冯琰.坡地土壤养分流失研究概况[J].土壤通报,2005,36(5):753-759
- [3] Belnap J, Harper K T, Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: Nitrogenase activity, chlorophyll content and chlorophyll degradation [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1994, 8: 1-8

- [4] 吴玉环,高谦,于兴华. 生物土壤结皮的分布影响因子及其监测[J]. 生态学杂志, 2003, 22(3): 38-42
- [5] 张振国,焦菊英,白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中生物土壤结皮特征[J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 33-37
- [6] 赵允格,许明详,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
- [7] 赵允格,许明详,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
- [8] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670
- [9] 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饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40
- [10] 王翠萍,廖超英,孙长忠,等. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54-59
- [11] 冉茂勇,赵允格,陈彦芹. 黄土丘陵水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 37-40
- [12] 卜楠,朱清科,王蕊,等. 陕北黄土区生物土壤结皮抗冲性研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 96-101
- [13] 焦雯璐,朱清科,张宇清,等. 陕北黄土区退耕还林地生物结皮分布及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(1): 102-107
- [14] 张健,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 14-20
- [15] 吕建亮,廖超英,孙长忠,等. 黄土地表藻类结皮分布影响因素研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 11-14
- [16] 肖波,赵允格,邵明安. 黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应[J]. 草地学报, 2008, 16(1): 28-33
- [17] 张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究: 以神木六道沟小流域为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 93-94
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 30-108
- [19] Belnap J, Gillette D A. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah [J]. Land Degradation and Development, 1997, 8: 355-362
- [20] 徐杰,白学良,杨持,等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 545-551
- [21] Kleiner E F, Harper K T. Soil properties in relation to cryptogamic ground cover in Canyonlands National Park [J]. Journal of Range Management, 1977, 30: 202-205
- [22] 肖波,赵允格,许明详,等. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1019-1026
- [23] 吴楠,张元明,王红玲,等. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3785-3793
- [24] Beyschlag W, Wittland M, Jentsch A, et al. Soil crusts and disturbance benefit plant germination, establishment and growth on nutrient deficient sand [J]. Basic and Applied Ecology, 2008, 9: 243-252
- [25] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等. 坡度对坡面土壤矿质氮素水蚀流失负荷的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 14-17

(责任编辑:程云)