

网络出版时间:2014-05-28 11:34

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.020

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.020.html

# 黄土丘陵区生物结皮条件下土壤有机质及氮素的累积特征

姚春竹<sup>1a,1b</sup>,赵允格<sup>1b</sup>,王媛<sup>1a,1b</sup>,张培培<sup>1b,2</sup>

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院,b 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,陕西 杨凌 712100;  
2 中国科学院大学,北京 100049)

**[摘要]** 【目的】研究生物结皮条件下土壤有机质及不同形态氮素含量的变化,明确生物结皮养分积累及培肥土壤的作用,为其潜在的环境风险评价提供依据。【方法】采用野外调查结合室内分析的方法,调查黄土丘陵区不同发育年限生物结皮的样地,分层采集样地的土壤样品,同时以同一区域退耕 1 年以内的撂荒地作为对照(CK),测定生物结皮层以及 0~2,2~5,5~10 cm 土层有机质、全氮及碱解氮、硝态氮、铵态氮含量。【结果】1)生物结皮条件下,结皮层土壤全氮和有机质的积累过程可分为快速增长和趋于稳定 2 个阶段,这 2 个阶段以生物结皮发育 13 年为界限。结皮发育 13 年时,结皮层土壤全氮含量达到 1.34 g/kg,是对照的 3.72 倍;有机质含量为 25.41 g/kg,是对照的 5.05 倍。2)生物结皮明显增加了结皮层土壤碳氮比,结皮发育 15 年时,结皮层土壤的碳氮比最高,为 11.8,但碳氮比与发育年限无关。3)结皮层土壤碱解氮含量及其占全氮的比例明显高于 0~10 cm 土壤和对照,碱解氮含量在生物结皮发育 15 年时达到最大值(94.89 mg/kg),是对照的 6.51 倍,之后趋于稳定。4)生物结皮增加了结皮层土壤硝态氮和铵态氮的含量以及硝铵比。【结论】生物结皮可以明显提高结皮层土壤氮素含量,增加土壤肥力,对土壤表层氮素积累有重要作用,与此同时,生物结皮也有可能增加氮素的流失风险。

**[关键词]** 生物结皮;土壤氮素;有机质;累积特征;

**[中图分类号]** S158.3

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2014)06-0197-08

## Accumulation of soil organic matter and nitrogen with biological soil crust in the Hilly Loess Plateau Region

YAO Chun-zhu<sup>1a,1b</sup>, ZHAO Yun-ge<sup>1b</sup>, WANG Yuan<sup>1a,1b</sup>, ZHANG Pei-pei<sup>1b,2</sup>

(1a College of Natural Resources and Environment, b State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** 【Objective】 This study explored the changes of soil organic matter and nitrogen with biological soil crusts (BSCs), to understand the nutrient accumulation and the soil fertility ability of the BSCs, and provide reference for assessing the potential environmental risks. 【Method】 Through field survey combined with laboratory analysis, soil samples from crusts, and soil layers of 0-2 cm, 2-5 cm, and 5-10 cm were collected from re-vegetated grasslands with BSCs at different ages in the Hilly Loess Plateau Region. Samples from the re-vegetated grassland with age of less than one year (fresh re-vegetated grassland) were also collected as control. Contents of soil organic matter, total nitrogen and different nitrogen components

**[收稿日期]** 2013-10-25

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(41271298);中国科学院“西部之光”联合学者项目

**[作者简介]** 姚春竹(1989-),女,黑龙江富锦人,在读硕士,主要从事生物结皮土壤氮循环研究。E-mail:ycz\_200@163.com

**[通信作者]** 赵允格(1971-),女,陕西咸阳人,研究员,博士,主要从事生物土壤结皮及其生态功能、土壤系统中的物质迁移研究。E-mail:zyunge@ms.iswc.ac.cn

were measured. 【Result】 1) With BSCs, the accumulation of soil organic matter and total nitrogen had two stages. After 13 years of rehabilitation, the content of total nitrogen (1.34 g/kg) and soil organic matter (25.41 g/kg) were 3.72 and 5.05 times of those of the control, respectively. Starting from 13 years, the accumulation tended to be stable. 2) Soil C/N ratio was increased by BSCs with a maximum of 11.8 after 15 years of rehabilitation. But the ratio was independent from the ages of BSCs. 3) The content of soil alkali-hydrolyzable nitrogen, and its ratio to total nitrogen in BSCs were higher than those in soil layer of 0–10 cm and the control. After 15 years of rehabilitation, the content of alkali-hydrolyzable nitrogen reached the maximum of 94.89 mg/kg, which was 6.51 times of that of the control. 4) Both the contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen and the ratio of nitrate nitrogen to ammonium nitrogen in BSCs were significantly increased. 【Conclusion】 Biological soil crusts significantly improved soil nitrogen contents in the crust layers, increased soil fertility, and played an important role in the nitrogen accumulation in topsoil. However, BSCs may increase the risk of nitrogen losses in the slope land on the Hilly Loess Plateau.

**Key words:** biological soil crusts; soil nitrogen; soil organic matter; evolution characteristics

氮素既是植物生长必需的三大营养元素之一, 同时又是重要的污染元素之一。土壤中氮素常常会引发一系列环境问题, 如水体污染、淡水酸化<sup>[1]</sup>、海洋富营养化<sup>[2]</sup>以及反硝化作用产生的温室气体<sup>[3]</sup>等。因此, 国内外学者对土壤氮素及其转化开展了许多研究, 认为土壤 pH、水分、有机质和 C/N 等诸多因素都会影响氮素的转化, 从而改变其有效性及对环境风险性。生物土壤结皮(简称生物结皮)是由隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓类和土壤中微生物以及其他生物体通过菌丝体、假根系和分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的复杂复合体<sup>[4-5]</sup>, 是干旱半干旱地区普遍存在的地被物<sup>[6]</sup>。生物结皮中包含多种固氮菌, 能将大气中的 N<sub>2</sub> 还原、固定为可被生物所利用的铵态氮<sup>[7]</sup>。Elbert 等<sup>[8]</sup>研究得出, 全球生物结皮的固氮量可达到 45 Tg/年, 约占全球生物固氮总量的 40%。同时, 作为具有生命活性的有机复合层, 生物结皮可以从多个方面改变土壤的理化属性, 如增加土壤稳定性<sup>[9]</sup>、改善土壤水分状况<sup>[10]</sup>、增加土壤有机质<sup>[11]</sup>、降低土壤 pH<sup>[12]</sup>等, 从而影响土壤氮素的转化。目前, 相关研究主要集中于生物结皮的固氮作用及其影响因子、生物结皮对土壤氮素的累积作用等方面<sup>[13-14]</sup>, 鲜有研究关注生物结皮对土壤中氮素分量的影响, 生物结皮固定氮素的去向也不明确。

我国土壤侵蚀最严重的区域之一——黄土丘陵区有大面积的生物结皮分布, 退耕还林还草等生态恢复措施实施之后, 更为生物结皮发育提供了有利条件, 盖度可以达到 70% 左右<sup>[15]</sup>。肖波等<sup>[13]</sup>在该地区的研究发现, 生物结皮的形成, 使土壤全氮分布呈表聚现象, 且随退耕年限的延长, 表聚现象越明

显。但该研究未涉及其他氮素形态的变化, 因此, 尚不能很好地反映该地区退耕地土壤氮素组分的累积特征及氮素流失风险。为此, 本试验以黄土丘陵区为研究区域, 以人为扰动少、有生物结皮形成的退耕撂荒地研究对象, 对不同退耕年限(0~30 年)的生物结皮进行调查取样, 对其不同土层的氮素含量、形态及有机质含量进行分析, 以期揭示生物结皮条件下土壤有机质及氮素的累积特征, 为评价生物结皮条件下土壤氮素潜在的环境效应提供依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验在中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场及周边山地进行。该站地处黄土高原中部的陕西省延安市安塞县境内, 属典型的黄土丘陵沟壑区。气候区划上属暖温带半干旱季风气候。研究区平均海拔 1 200 m, 相对高差 100~300 m, 年均气温 8.8 °C, 多年平均降水量 505 mm。年日照 2 300~2 400 h, ≥10 °C 的积温为 3 282 °C, 干燥度指数 1.48, 无霜期 157 d, 降水年度分配不均, 7—9 月降水量占年降水量的 60%, 且多暴雨。

地带性土壤为黑垆土(干润均腐土)。由于严重的水土流失, 原有的黑垆土损失殆尽, 土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥形土)为主。地带性植被为暖温性灌草丛和草甸草原群落, 代表性的植物群落有长芒草(*Stipabungeana*)、白羊草(*Bothriochloaischaemun*)和茭蒿(*Artemisia giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)。

退耕还林实施后, 研究区封禁的荒坡草地上生

物结皮覆盖度可以达到 60%~70%,主要分布于高等维管束植物之间的空地上,沟坡较梁峁坡分布面积更广。组成上,阴坡以藓类植物结皮为主,阳坡则以藻结皮为主,地衣成分较少(盖度小于 10%)<sup>[13]</sup>。

### 1.2 样品采集

选择海拔高度、坡度等地理条件基本一致,生物结皮相对完整、人为扰动较少、生物结皮发育年限不同的撂荒地作为研究样地,每种样地 3~4 个重复。选取同一区域退耕 1 年内的撂荒地作为对照(CK)。

样地基本情况见表 1。在每个样地内随机设立 4 个 5 m×5 m 的样方,每个大样方中随机选择 10 个 25 cm×25 cm 的小样方,调查其生物结皮的物种组成、盖度及样地植被组成。并在每个样地选取 4 个点分层采集结皮层以及 0~2, 2~5, 5~10 cm 土层的土壤样品,同一土层土样混合作为一个分析样。土样采集点选在高等植被间的空地,避免植被根系影响。样品室内风干后磨细过孔径 2, 1 和 0.25 mm 的筛备用。

表 1 调查样地的概况

Table 1 Characteristics of sampling plots

生物结皮发育年限/年 Development ages	样地数量 Number of sample plots	植被群落 Community	植被平均盖度/% Average coverage of vegetation	结皮平均盖度/% Average coverage of BSCs
CK	3	—	—	—
3	4	茵陈蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )	40	89
5	3	茵陈蒿( <i>A. scoparia</i> ),长芒草( <i>Stipabun geana</i> )	45	89
6	3	茵陈蒿( <i>A. scoparia</i> ),长芒草( <i>S. geana</i> )	80	82
8	3	茵陈蒿( <i>A. scoparia</i> ),长芒草( <i>S. geana</i> )	35	74
12	3	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> ),茵陈蒿( <i>A. scoparia</i> )	75	86
13	3	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> ),茵陈蒿( <i>A. scoparia</i> )	45	78
15	4	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> ),沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> )	59	74
17	4	长芒草( <i>S. geana</i> )	47	86
20	12	铁杆蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	71	91
28	3	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> )	53	88
30	11	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> ),沙打旺( <i>A. adsurgens</i> )	64	62

注:样地海拔 1 080~1 345 m。CK 为调查区域内退耕 1 年以内的撂荒地。

Note: The altitude of the plots is 1 080—1 345 m. CK plot was the re-vegetated grassland with age less than one year.

### 1.3 测定项目及方法<sup>[15]</sup>

土壤全氮含量用凯氏定氮法测定,碱解氮含量用碱解扩散法测定,有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。硝态氮和铵态氮含量的测定方法:取过孔径 2 mm 筛的土壤样品 5 g,在 25 °C 下,用 50 mL 的 1 mol/L KCl 溶液振荡提取 30 min,过滤后用 AA3 全自动流动分析仪测定。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2007 与 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据处理及统计分析。对同一年限不同土层以及同一土层不同年限的土壤各氮素形态和有机质含量进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同发育年限生物结皮对土壤全氮和有机质含量的影响

不同发育年限的生物结皮土壤中氮素和有机质含量见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知,同一发育年

限下,土壤全氮和有机质含量随着土层的加深而减少。不同发育年限生物结皮对土壤全氮和有机质含量的影响在结皮层表现最为突出,对下层土壤(0~10 cm 土壤)影响不明显。因此,本试验在对比不同发育年限生物结皮对土壤氮素和有机质的影响时,仅对结皮层土壤和 5~10 cm 土壤进行分析。

经过分析可知,以退耕 13 年为界限,土壤全氮和有机质的积累过程大致可分为快速增长阶段和稳定阶段。在快速增长阶段,结皮层的全氮和有机质含量与退耕年限呈显著的正相关关系( $R^2$  分别为 0.752 和 0.694)。退耕 5 年时结皮层土壤全氮和有机质含量分别达到 0.64 和 10.50 g/kg,是 CK 的 1.78 和 2.09 倍,差异显著;在退耕 13 年时,结皮层土壤全氮和有机质含量达到了 1.34 和 25.42 g/kg,是 CK 的 3.72 和 5.05 倍,之后虽有波动,但总体趋于稳定。随着退耕年限的延长,5~10 cm 土层土壤全氮和有机质含量分别为 0.24~0.52 和 3.69~7.79 g/kg,不同退耕年限之间无明显差异。

表 2 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对各土层土壤全氮含量的影响

Table 2 Total nitrogen contents of BSCs with different ages at different soil layers in the Hilly Loess Plateau Region g/kg

生物结皮发育年限/年 Development ages	结皮层 Biocrust	土层 Soil layer		
		0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm
CK	0.36±0.03 aA	0.36±0.03 a	0.34±0.03 a	0.31±0.03 aA
3	0.57±0.08 aAB	0.27±0.03 b	0.27±0.02 b	0.24±0.04 bA
5	0.64±0.09 aBC	0.42±0.04 b	0.39±0.07 b	0.39±0.11 bB
6	0.79±0.03 aBC	0.50±0.09 b	0.44±0.11 b	0.38±0.01 bB
8	0.86±0.14 aCD	0.37±0.02 b	0.33±0.04 b	0.27±0.01 bA
12	1.08±0.07 aDE	0.64±0.08 b	0.52±0.04 c	0.39±0.06 dB
13	1.34±0.17 aE	0.68±0.40 b	0.58±0.40 b	0.52±0.70 bB
15	1.30±0.90 aE	0.58±0.80 b	0.41±0.05 c	0.34±0.04 cC
17	1.07±0.25 aE	0.54±0.07 b	0.42±0.05 b	0.38±0.04 bC
20	1.16±0.14 aE	0.59±0.06 b	0.51±0.06 bc	0.47±0.05 cB
28	1.09±0.12 aDE	0.59±0.02 b	0.50±0.06 b	0.49±0.05 bB
30	1.22±0.05 aE	0.51±0.06 b	0.43±0.05 c	0.35±0.04 dC

注:同行数据后标不同小写字母者表示同一发育年限下不同土层土壤间差异达显著水平;标不同大写字母者表示同一土层不同发育年限间差异达显著水平( $P<0.05$ )。CK 因未形成生物结皮,只有物理结皮,所以该样地结皮层土壤各养分含量同 0~2 cm 土层土壤。下表同。

Note: Different lowercase letters in each row mean significant difference among different soil layers. Different uppercase letters in each row means significant difference among different development ages ( $P<0.05$ ). CK was only with physical crust. Its nutrient content was set the same as those of 0-2 cm soil. The same below.

表 3 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对各土层土壤有机质含量的影响

Table 3 Organic matter contents of BSCs with different ages at different soil layers in the Hilly Loess Plateau Region g/kg

生物结皮发育年限/年 Development ages	结皮层 Biocrust	土层 Soil layer		
		0~2 cm	2~5 cm	5~10 cm
CK	5.03±0.48 a A	5.03±0.48 a	4.83±0.24 a	4.35±0.64 aAB
3	10.05±1.92 aB	3.78±0.08 b	3.78±0.22 b	3.69±0.17 bA
5	10.50±0.73 aB	6.20±0.69 b	5.88±1.00 b	5.65±0.91 bCD
6	13.45±1.23 aBC	8.23±0.45 b	7.43±0.85 b	6.40±0.24 bDE
8	16.11±1.97 aCD	5.37±0.29 b	4.53±0.28 b	4.05±0.32 bA
12	18.58±0.84 aDE	8.61±1.92 b	6.96±1.61 bc	4.83±0.39 aBC
13	25.42±4.52 aF	10.82±0.93 b	9.19±0.13 b	7.79±0.62 bF
15	26.26±2.32 aF	9.97±1.52 b	6.55±1.03 c	4.94±0.27 aBC
17	21.25±4.72 aEF	8.01±1.80 b	5.92±1.08 b	5.90±0.56 bCD
20	21.67±3.17 aEF	8.59±0.93 b	7.34±0.81 bc	6.07±1.20 cCD
28	18.36±3.37 aDE	9.54±0.19 b	7.60±0.48 b	7.32±0.85 bEF
30	21.68±3.80 aEF	7.86±0.99 b	6.46±1.15 bc	5.51±0.61 cBCD

## 2.2 不同发育年限生物结皮对土壤碳氮比(C/N)的影响

碳氮比是表征土壤质量变化的重要指标,影响着土壤中有有机碳和氮的循环。碳氮比的高低可以反映土壤微生物群落的结构特征<sup>[16]</sup>,土壤中氮素的固定、矿化和硝化也与其密切相关<sup>[17]</sup>。

生物结皮对土壤碳氮比的影响见图 1。由图 1 可知,生物结皮发育初期结皮层和各土层土壤碳氮比约为 8.0;之后随着生物结皮发育年限的延长,结皮层土壤的碳氮比总体呈增大趋势,在生物结皮发育 15 年时达到最大值,为 11.8;0~2,2~5 和 5~10 cm 土层的土壤碳氮比随生物结皮发育年限的增大变化不大,差异不显著。表明生物结皮可显著提高结皮层土壤碳氮比,对下层土壤碳氮比影响不大,

且与其发育年限无关。

## 2.3 不同发育年限生物结皮对土壤碱解氮含量的影响

碱解氮反映了土壤的氮素动态、供氮水平和土壤的肥力状况<sup>[18]</sup>。生物结皮改善了土壤理化性质以及土壤微生物种群结构,进而影响土壤中氮素的矿化速率。由图 2 可知,在同一生物结皮发育年限下,随着土层的加深,碱解氮含量逐渐降低。经分析可知,除结皮发育 13 年和 15 年外,其他发育年限样地 0~2,2~5 和 5~10 cm 土层碱解氮含量之间差异不显著,故本试验在对比不同发育年限生物结皮对土壤碱解氮含量的影响时,只对结皮层土壤和 5~10 cm 土层土壤进行分析。在生物结皮发育的前 15 年,结皮层土壤碱解氮含量随发育年限的延长

而增加;生物结皮发育 15 年时,结皮层土壤碱解氮含量达到最大值 94.89 mg/kg,是 CK 的 6.51 倍;

随着结皮发育年限的延长,5~10 cm 土层土壤碱解氮含量在 11.47~29.80 mg/kg,变化范围较窄。

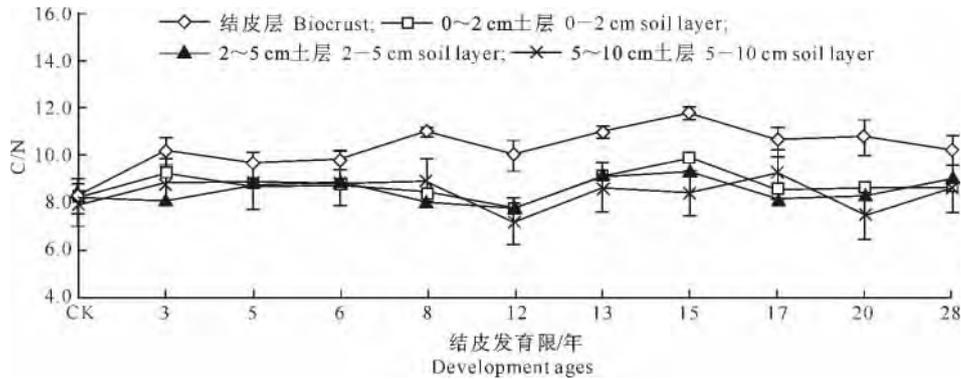


图 1 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对各土层土壤碳氮比的影响

Fig. 1 Soil C/N ratios of BSCs with different ages at different soil layers in the Hilly Loess Plateau Region

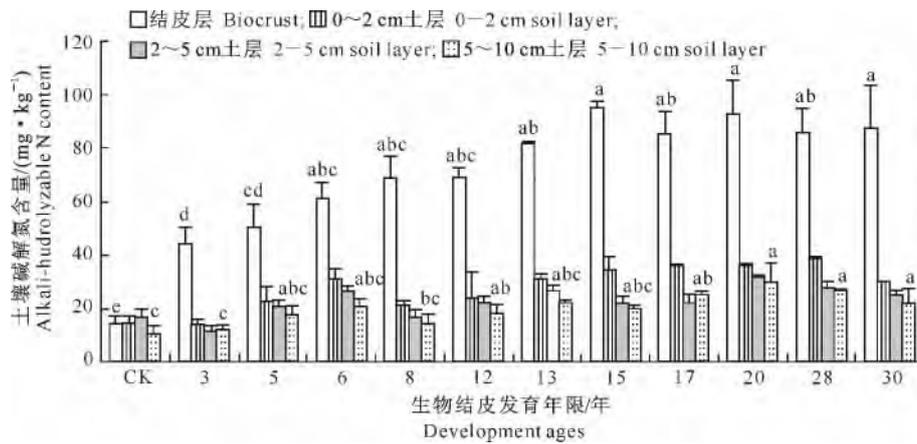


图 2 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对结皮层和不同土层土壤碱解氮含量的影响

结皮层和 5~10 cm 土层图柱上标不同小写字母者表示不同结皮发育年限之间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Contents of soil alkaline nitrogen of BSCs with different ages at different soil layers in the Hilly Loess Plateau Region

Different letters at different layers means significant difference of biocrusts and 5-10 cm layer ( $P < 0.05$ )

图 3 显示,生物结皮发育不同年限下,0~2,2~5 和 5~10 cm 土层土壤的碱解氮占全氮的比例差异不显著。生物结皮发育前 13 年,结皮层土壤碱解氮占全氮的比例明显高于 0~2,2~5 和 5~10 cm 土层;13 年之后,结皮层土壤碱解氮占全氮的比例虽然仍比 0~2,2~5 和 5~10 cm 土层土壤高,但差异减小。对比表 2 和图 2 可知,生物结皮发育的前 13 年,结皮层土壤全氮和碱解氮含量随发育年限的增加而逐渐积累,13 年之后趋于稳定。以上结果表明,生物结皮不仅可以固定氮素并积累到土壤中,还可以明显改善结皮层土壤有效氮的比例,增加土壤中氮素的有效性。生物结皮发育 13 年之后,结皮层土壤中氮素含量趋于稳定,其有效氮的比例与下层土壤差异不大。

#### 2.4 生物结皮对土壤硝态氮、铵态氮及其比值的影响

为了便于分析,按照样地的生物结皮发育年限,将样地划分为 <5 年、≥5~<10 年、≥10~<15 年、≥15~<20 年、≥20~<25 年和 ≥25~<30 年 6 个时段,由之前的结果可知,生物结皮只对结皮层土壤全氮和碱解氮水平有明显影响,因此本试验仅分析结皮层和 0~2 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮的变化,结果见图 4。由图 4 可知,随着结皮发育年限的增加,结皮层和 0~2 cm 土层土壤硝态氮含量总体呈上升趋势。在生物结皮发育的前 10 年,结皮层和 0~2 cm 土层硝态氮含量差异不明显;10 年后,结皮层土壤硝态氮含量明显高于 0~2 cm 土层,其中结皮层土壤硝态氮含量为 1.75~2.01 mg/kg,其最大值是 CK 的 10.5 倍,0~2 cm 土层土壤硝态氮

含量为 0.78~1.39 mg/kg,其最大值是 CK 的 7.3 倍。0~2 cm 土层土壤铵态氮含量明显低于结皮层土壤铵态氮含量,且随结皮发育年限的增加而波动,在发育年限  $\geq 15 \sim < 20$  年时,达到最大值(5.91 mg/kg)。结皮层土壤铵态氮含量变化与硝态氮含

量变化趋势基本一致,总体呈上升趋势,在生物结皮发育的前 10 年,结皮层土壤铵态氮与 CK 无明显差异;10 年之后,结皮层土壤铵态氮显著升高,达 7.70~8.81 mg/kg,最大值出现在结皮发育年限  $\geq 20 \sim < 25$  年时,是 CK 的 2.4 倍。

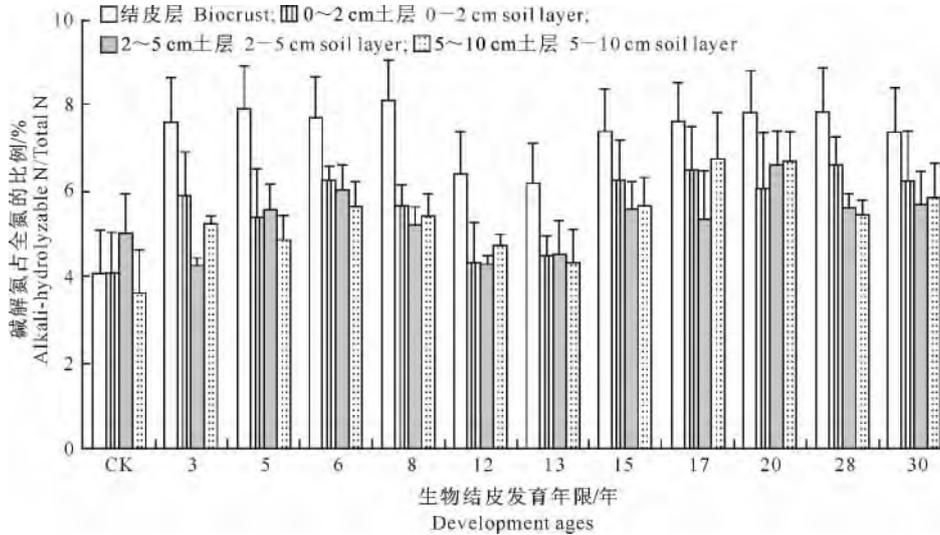


图 3 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对各土层碱解氮占全氮比例的影响

Fig. 3 Ratios of soil alkaline nitrogen to total nitrogen of BSCs with different ages at different soil layers in the Hilly Loess Plateau Region

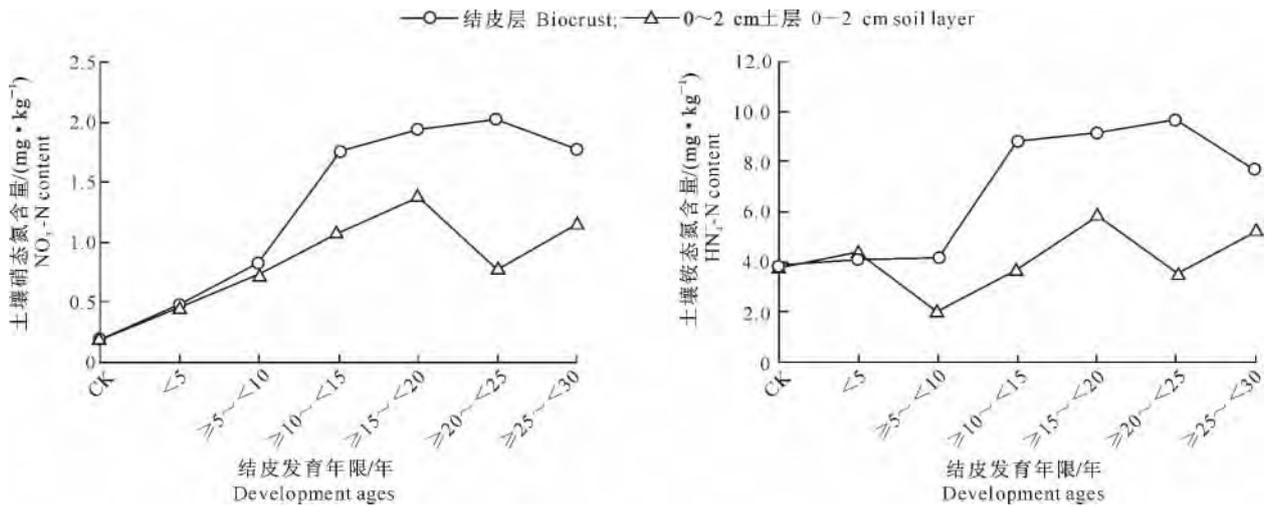


图 4 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对结皮层和 0~2 cm 土层土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

Fig. 4 Contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen of BSCs with different ages at BSC layer and 0-2 cm soil layer in the Hilly Loess Plateau Region

由图 5 可知,在生物结皮发育的前 10 年,结皮层土壤的硝铵比随着发育年限的延长而增大;发育 10 年后,结皮层土壤硝铵比稳定在 0.2 左右。0~2 cm 土层的硝铵比随着结皮发育年限的延长先增大后减小,至发育年限  $\geq 5 \sim < 10$  年时达到最大值(0.35);之后随着发育年限的进一步延长而下降,到

结皮发育  $\geq 15 \sim < 20$  年时降到 0.24,之后趋于稳定。在结皮发育的前 5 年,结皮层土壤硝铵比与 0~2 cm 土层差异不显著,但从结皮发育年限  $\geq 5 \sim < 10$  年开始,两者有较大差距,至发育年限  $\geq 15 \sim < 20$  年之后,结皮层和 0~2 cm 土层的硝铵比差异减小,趋于一致。

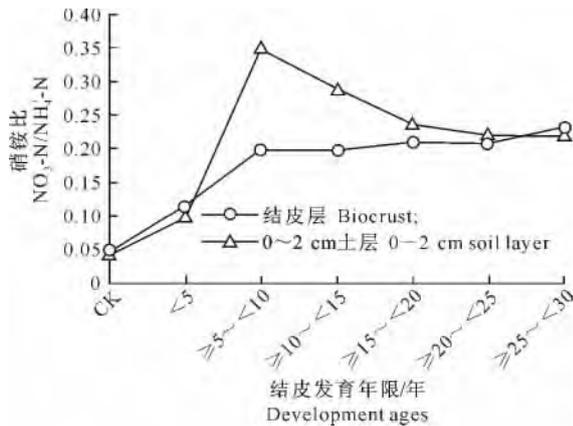


图 5 黄土丘陵区不同发育年限生物结皮对结皮层和 0~2 cm 土层土壤硝铵比的影响

Fig. 5 Ratios of nitrate nitrogen to ammonium nitrogen of BSCs with different ages at BSC layer and 0-2 cm soil layer in the Hilly Loess Plateau Region

### 3 讨 论

生物结皮在干旱、半干旱生态系统中有重要的生态功能。目前国内外学者在生物结皮氮素积累方面开展了不少研究。Belnap<sup>[7]</sup>指出,生物结皮中含有多种固氮菌,可以增加土壤氮素含量。肖波等<sup>[13]</sup>研究发现,退耕地在退耕 10 年后结皮层土壤全氮可以达到初始退耕地的 2 倍左右。本研究结果表明,生物结皮可以增加结皮层土壤的全氮和碱解氮含量,且在一定时间内随着结皮发育时间的延长而增加,与前人的研究结果相似。生物结皮的固氮作用<sup>[19]</sup>及其死亡残体等都为土壤提供了丰富的氮源。由于植物的富集作用,苔藓结皮会吸收土壤中的速效养分,并将其聚集在根系(假根系)周围,供其吸收利用,导致结皮层土壤的速效氮高于下层土壤。结皮层丰富的微生物及其分泌物可能也是结皮层碱解氮含量相对较高的重要原因之一。

本研究中,生物结皮的形成除了增加了结皮层土壤全氮和速效氮含量之外,还可以增加结皮层土壤的硝态氮和铵态氮含量,提高土壤碳氮比和土壤硝铵比,有活化土壤表层氮素的作用。Klubek 等<sup>[19]</sup>发现,生物结皮中 20% 的氮素以铵态氮的形式释放到细胞外,这可能导致结皮层土壤铵态氮含量增加,进而影响土壤硝铵比。结皮层丰富的微生物及其分泌物可以提高氮素活性,提高土壤矿化作用和硝化作用,这也可以增加结皮层土壤铵态氮和硝态氮含量。Zaady 等<sup>[20]</sup>的研究表明,生物结皮固定的碳可以增加土壤中的有机质含量,提高土壤肥力。肖波等<sup>[21]</sup>研究发现,生物结皮的形成除了增加土壤

氮素外,对土壤有机质也有积累作用,且该作用在结皮层表现的最明显。此外,碳氮比深刻影响着土壤微生物的活性,较低的 C/N 可以提供足够的氮源供微生物消耗,提高其活性<sup>[22]</sup>。而生物结皮的形成提高了土壤碳氮比,抑制了微生物的分解作用,这也从另一个方面增加了结皮层土壤的有机碳含量。

本研究中,不同发育年限生物结皮对结皮层土壤全氮和速效氮含量都有明显的促进作用,与 0~2 cm 土层土壤相比,生物结皮显著增加了土壤硝态氮含量。研究区域内,降雨(年均降雨量为 500 mm)集中,常形成地表径流。氮素随地表径流迁移是农业面源污染、水体富营养化的重要原因之一<sup>[23]</sup>。表土有机质、有效氮养分的含量等都是影响径流氮浓度的主要因子<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,生物结皮增加了结皮层土壤有机质和碱解氮的含量,土壤有机质和碱解氮分别是对照的 5.05 和 6.51 倍,硝态氮含量也显著提高,这些都增加了氮素随径流流失的可能。同时生物结皮的形成改变了土壤表面孔隙状况、抗雨滴打击能力和土壤团聚体含量<sup>[25]</sup>等特性,因此生物结皮影响着土壤入渗产流过程。肖波等<sup>[21]</sup>在自然降雨的条件下,通过对有、无结皮的小区土样分析后发现,结皮小区的硝态氮流失总量比无结皮小区多 3.73%,证实了生物结皮的存在增加了土壤氮素随径流流失的风险。

综上所述,生物结皮对土壤表层氮素积累有重要作用,可显著提高土壤氮素含量,增加土壤肥力,为黄土丘陵区植被恢复创造条件。但是,随着氮素的积累,其流失风险和对环境的威胁也会增加。因此,在关注生物结皮积累养分、培肥土壤的同时,还应注意生物结皮导致的养分流失以及随之而来的环境问题。

### 4 结 论

1) 不同发育年限生物结皮明显增加了结皮层土壤全氮和有机质含量。随着结皮发育年限的延长,结皮层和 0~10 cm 土层土壤全氮和有机质含量的积累过程可分为快速增长和趋于稳定 2 个阶段。结皮层土壤全氮和有机质含量均在结皮发育 13 年时达最高值,分别是 CK 的 3.72 和 5.05 倍。结皮层土壤碱解氮含量在结皮发育 15 年时达到最大值,是 CK 的 6.51 倍。

2) 不同发育年限生物结皮显著影响结皮层土壤的碳氮比,结皮层土壤的碳氮比明显高于 0~10 cm 土层土壤,但这种影响与结皮发育年限无关。

3)不同发育年限生物结皮土壤在氮素累积的过程中提高了土壤中氮素的活性。在结皮发育 3~13 年时,结皮层土壤碱解氮占全氮的比例明显高于 0~10 cm 土层土壤。结皮发育 $\geq 20 \sim < 25$  年时,结皮层土壤硝态氮和铵态氮含量最高,分别为 CK 的 10.5 和 2.4 倍。生物结皮在氮素累积的同时也增加了氮素流失的风险。

#### [参考文献]

- [1] 陈刚才,甘露,王士禄.土壤氮素及其环境效应[J].地质地球化学,2001,29(1):63-67.  
Chen G C, Gan L, Wang S L. Soil nitrogen and its environmental effects [J]. Geology-Geochemistry, 2001, 29(1): 63-67. (in Chinese)
- [2] 朱兆良,孙波.我国农业面源污染的控制政策和措施[J].科技导报,2005,23(4):47-51.  
Zhu Z L, Sun B. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China [J]. Science Technology review, 2005, 23(4): 47-51. (in Chinese)
- [3] Ramanathan V. The greenhouse theory of climate change [J]. Science, 1988, 240: 293-299.
- [4] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(3): 389-415.
- [5] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: Structure, function, and management [M]. New York: Springer, 2001.
- [6] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semiarid regions [J]. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 179-223.
- [7] Belnap J. Factors influencing nitrogen fixation and nitrogen release in biological soil crusts [M]//Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: Structure, function, and management. Berlin: Springer, 2003: 241-261.
- [8] Elbert W, Andreae M O, Pöschl U. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: Neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen [J]. Biogeo Sciences Discuss, 2009, 6: 6983-7015.
- [9] 宋阳,严平,张宏,等.荒漠生物结皮研究中的几个问题[J].干旱区研究,2004,21(4):439-443.  
Song Y, Yan P, Zhang H, et al. Recent progress and some existing problems in the study on the desert microbiocrusts [J]. Arid Zone Research, 2004, 21(4): 439-443. (in Chinese)
- [10] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.  
Zhang K K, Bu C F, Gao G X. Effect of microbiocrust on soil water infiltration in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 808-812. (in Chinese)
- [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[J].生态学报,2007,27(11):4662-4670.  
Xiao B, Zhao Y G, Shao M A. Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion criss-cross region, Northern Shaanxi Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4662-4670. (in Chinese)
- [12] 吴楠,张元明,王红玲.古尔班通古特沙漠生物土壤结皮固氮活性[J].生态学报,2007,27:3785-3792.  
Wu N, Zhang Y M, Wang H L. On the nitrogen fixation by biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, northern Xinjiang of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27: 3785-3792. (in Chinese)
- [13] 肖波,赵允格,许明祥,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.  
Xiao B, Zhao Y G, Xu M X, et al. Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1019-1026. (in Chinese)
- [14] 苏延桂,李新荣,赵昕,等.不同类型生物土壤结皮固氮活性及对环境因子的响应研究[J].地球科学进展,2011,26(3):332-338.  
Su Y G, Li X R, Zhao X, et al. The nitrogen activity of biological soil crusts and their responses to environmental factors [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(3): 332-338. (in Chinese)
- [15] 明姣,赵允格,许明祥,等.黄土丘陵区不同降雨量带生物结皮对土壤氮素的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):102-110.  
Ming J, Zhao Y G, Xu M X. Impacts of biological soil crusts on soil nitrogen in different rainfall regions in hilly areas of the Loess Plateau, China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 102-110. (in Chinese)
- [16] Hogberg M N, Hogberg P, Myrold D D. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three [J]. Oecologia, 2007, 150(4): 590-601.
- [17] Aitkenhead J A, McDowell W H. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(1): 127-138.
- [18] 王晓岚,卡丽毕努尔,杨文念.土壤碱解氮测定方法比较[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(1):76-78.  
Wang X L, Kalibinuer, Yang W N. Comparison of methods for determining alkali-hydrolyzed nitrogen soil [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(1): 76-78. (in Chinese)
- [19] Klubek B, Eberhardt P J, Skujins J. Ammonia volatilization from Great Basin Desert soils [M]//West N E, Skujins J J. Nitrogen in desert ecosystems. New York: Academic Press of Stroudsburg, 1978: 107-129.

(下转第 212 页)

- 染现状评价 [J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(3): 329-335.
- Du B, Sun Q, Qi Z C, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of Xiaodian sewage irrigation area in Taiyuan [J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2011, 32(3): 329-335. (in Chinese)
- [34] Colak, Mumtaz. Heavy metal concentrations in sultana-cultivation soils and sultana raisins from Manisa (Turkey) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(3): 695-712.
- [35] Lee Pyeong-Koo, Youm Seung-Jun, Jo Ho-Young, et al. Heavy metal concentrations and contamination levels from Asian dust and identification of sources: A case-study [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 1018-1025.
- [36] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
China National Environmental Monitoring Centre. China's soil element background values [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese)
- [37] 贾振邦, 周 华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(4): 525-530.
- Jia Z B, Zhou H, Zhao Z J, et al. The application of the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in sediments in the Benxi section of the Taizi River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis: Natural Science Edition, 2000, 36(4): 525-530. (in Chinese)
- [38] 裴延全, 王里奥, 包 亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析 [J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 206-211.
- Pei Y Q, Wang L A, Bao L, et al. Distribution characteristics and evaluation of soil heavy metals in water-level-fluctuating zone in Xiaojiang River [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 206-211. (in Chinese)

(上接第 204 页)

- [20] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, et al. Patterns of CO<sub>2</sub> exchange in biological soil crusts of successional age [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 959-966.
- [21] 肖 波, 赵允格, 许明祥, 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.
- Xiao B, Zhao Y G, Xu M X, et al. Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1019-1026. (in Chinese)
- [22] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析 [J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 344-352.
- Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, et al. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 344-352. (in Chinese)
- [23] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.
- Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200-205. (in Chinese)
- [24] 马 骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同植被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1526-1536.
- Ma Q, Yu X X, Liu Q J, et al. Effect of physicochemical properties of brown earth under different land cover in the Yimeng mountainous area on the output of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1526-1536. (in Chinese)
- [25] 杨 凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 173-177.
- Yang K, Zhao Y G, Ma X X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 173-177. (in Chinese)