

黄土丘陵区退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质分异特征^①

张健^{1,3}, 刘国彬^{1,2*}, 许明祥^{1,2}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100;

3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文对黄土丘陵区退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质分异特征进行了研究。结果表明, ①该区生物结皮影响下的土壤腐殖质组分HA、FA和HM含量均有明显的分层特征, 土层间均表现出: 结皮层>0~2 cm土层>2~5 cm土层; 不同年限生物结皮土壤腐殖质含量总体表现出: 16年>8年>32年>12年, 表明退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质含量随时间变化呈非线性变化趋势; HA/FA平均值变化范围为0.34~0.70, 低于1, 该区生物结皮影响下的土壤腐殖质胡敏酸含量不高, 腐殖酸以富啡酸为主; ②结皮层土壤腐殖酸E4/E6值随时间变化总体上呈“抛物线”型变化趋势; 而0~2 cm和2~5 cm土层土壤腐殖酸E4/E6值呈缓慢增长的趋势; ③腐殖质组分与土壤养分因子的全N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和有效Zn之间存在极显著的线性相关关系 ($p < 0.01$); ④土壤腐殖质组分含量的变化与全N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和有效Zn含量间存在满足二项式的函数回归关系 ($p < 0.01$), 表明生物结皮对土壤C素与N素和有效Zn的影响密切相关。

关键词: 生物结皮; 腐殖质; 退耕地; 黄土丘陵区

中图分类号: S153.622

生物结皮 (biological soil crusts, BSCs) 是指由不同种类的苔藓、地衣、地钱、藻类、真菌、蓝藻以及细菌等生物组成^[1]与其下层很薄的土壤共同形成的一个复合的生物土壤层^[2]。由于生物结皮具有能在干旱、极温 (可达 70℃)、高pH和高盐度的条件下生存的特殊能力^[3], 它在全球范围内的干旱和半干旱地区均有广泛分布^[1], 并且在区域景观的结构和功能方面发挥着重要作用^[4-6]。土壤有机质影响着生态系统的C、N和其他主要元素的循环, 是土壤肥力指标之一。土壤腐殖质是动、植物残体通过微生物分解、合成的一类高分子有机物^[7]; 它是土壤有机质的主体, 是土壤固相中对土壤性质最有影响且能反映土壤形成过程的活跃部分^[8], 在土壤肥力和生态环境等方面都具有重要作用。

黄土丘陵区地处半干旱和半湿润气候, 在退耕还林还草工程实施后, 如今生物结皮广为发育已成为该区一种极为常见的地被景观。在该区植被演替过程研究中, 生物结皮已作为一个重要因子受到关注^[9-12]。已有大量报道表明: 在干旱和半干旱地区, 生物结皮的

形成和发育对土壤的形成、肥力和稳定过程^[1,6,13], 抵抗土壤的风蚀和水蚀^[13-15], 调控土壤水文^[16-17], 高等植物的定居及植被演替^[18]等方面都有着重要意义。生物结皮对黄土丘陵区结皮层和一定深度的结皮下层土壤性质有重要影响^[9-11]。然而, 目前有关黄土高原生物结皮对土壤腐殖质影响的文章还未见报道。本文旨在研究黄土丘陵区生物结皮影响下的土壤腐殖质特征, 为理解生物结皮在该区生态系统中的重要作用提供依据。

1 研究区概况和试验方案

1.1 研究区概况

研究区位于陕北安塞县 (36°31'~37°20'N, 108°52'~109°26'E), 该区地形破碎, 沟壑纵横, 属典型的黄土高原丘陵沟壑区, 暖温带半干旱半湿润气候, 年均降雨量为 500 mm 左右, 年平均蒸发量 1 000 mm, 无霜期 160~180 天左右, 年日照时数 2 352~2 573 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2 866℃, 年均气温 8.9℃。

地带性土壤为黑垆土 (干润均腐土)。由于严重的

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407205)、国家自然科学基金重点项目 (90502007) 和中国科学院知识创新项目 (KZCX2-XB2-05-03) 资助。

* 通讯作者 (gblu@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 张健 (1980—), 男, 吉林梨树人, 博士研究生, 主要从事植被恢复与环境效应方面研究。E-mail: zhangjian12102@163.com

水土流失, 原有的黑垆土损失殆尽。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主。在植被分区上属于暖温带森林草原南缘, 天然森林已破坏, 现有植被资源主要为人工林草和退耕地或撂荒地上形成的天然植被。其中, 天然草地最为常见的植物主要有茵陈蒿 (*Artemisia capillaries*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus* Willd.)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、胡枝子 (*Lespedeza Michx.*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、芨蒿 (*Artemisia giraldii*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、披针苔草 (*Carex lanceolata* Boott.) 等处于不同演替阶段的优势种。

1.2 样地调查

选择不同退耕年限的恢复草地群落作为研究样地 (表 1)。选择的退耕年限分为: 8 年 (F8, 阿尔泰狗娃花为主的草地群落)、12 年 (F12, 铁杆蒿为主的草地群落初期)、16 年 (F16, 长芒草为主的草地群落) 和 32 年 (F32, 白羊草为主的草地群落) 4 块调查样地,

在选择的每块样地内, 采取随机样方法进行调查, 样方面积 50 cm × 50 cm, 调查样方数为 20 个。调查内容有生物结皮组成、分布、厚度等结皮指标, 植物种类、个体数、盖度、高度等植被指标; 对于植物应用了物种重要值 = (相对频度 + 相对盖度 + 相对密度) / 3, 计算物种的生态重要值, 通过选用物种 Margalef 丰富度指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 来计算群落的物种多样性。同时, 在每个样地调查样方中抽取 4 个样方, 每个样方内对苔藓类生物结皮用直径 5 cm 的环刀分结皮层 (由生物结皮厚度决定)、0 ~ 2 cm (结皮层以下从 0 点开始) 和 2 ~ 5 cm 土层采集混合样本 (5 个样点混合样品) 作为土壤分析样品, 共计 48 个土壤样品 (由于黄土丘陵区退耕地地表在无干扰状态下均有生物结皮覆盖, 所以本研究未设无结皮对照), 样品经室内风干后, 研碎并除去苔藓类生物体, 剩余的土壤成分过 0.25 mm 孔径的筛子备用。

表 1 研究样地的基本特征

Table 1 General feature of quadrates in study site

样地	地理坐标		坡向	海拔 (m)	年限 (a)	坡度 (°)	Margalef 丰富度指数 (D)	Pielou 均匀度指数 (J)	Shannon-Wiener 多样性指数 (H)
F8	109°18.44' E,	6°51.10' N	NE30°	1 309	8	15	7.07	1.47	1.94
F12	109°18.78' E,	6°51.29' N	NW25°	1 277	12	17	8.91	1.38	1.91
F16	109°18.46' E,	6°51.01' N	WN30°	1 254	16	14	6.92	1.56	2.03
F32	109°18.72' E,	6°51.09' N	SW30°	1 281	32	30	7.10	1.25	1.57

1.3 样品分析

土壤全 N 采用半微量凯氏定氮法测定; 土壤有效态 K、Cu、Zn、Mn 和 Fe 采用原子吸收法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 有机 C 根据有机质和有机 C 间的转换系数 1.724 计算求的; 腐殖质组成及其含量采用 0.1 mol/L 焦磷酸钠与 0.1 mol/L NaOH 混合液提取, 重铬酸钾容量法-外加热法测定 [19-20]。紫外光谱特征多用于对腐殖酸样品的研究 [21]。本文也对腐殖酸吸光值测量采用 UV-2300 (日本岛津) 分光光度计, 选定特定波长为 E_4 和 E_6 , E_4 和 E_6 分别表示为 465 nm 和 665 nm 波长时的吸光值 (Abs 值)。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS11.5 软件对数据进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 生物结皮土壤腐殖质组成和分布特征

土壤腐殖质是土壤有机质的主体, 是一类无定形、

呈棕褐色或棕黑色、亲水性、酸性、多分散的有机物质, 是广泛存在于土壤、水体 (如湖泊、河流、海洋和地下水等) 以及沉积物中的重要有机质 [22-23]。腐殖质按其在酸碱溶液中的溶解度分为胡敏酸 (HA)、富啡酸 (FA) 和胡敏素 (HM)。生物结皮影响下的土壤腐殖质组分的 HA、FA 和 HM 含量存在明显层次差异, HA、FA 和 HM 的含量土层分布均表现出: 结皮层 > 0 ~ 2 cm 土层 > 2 ~ 5 cm 土层 (表 2)。应用 LSD 法 (ANOVA) 进行各层之间土壤腐殖质组分含量的差异显著性检验。检验结果表明, 土壤腐殖质各组分均在结皮层与 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 5 cm 土层间的差异达极显著水平 ($p < 0.01$), 在 0 ~ 2 cm 与 2 ~ 5 cm 土层间差异不显著 ($p > 0.05$); 胡敏酸和富里酸的比值 (HA/FA) 在土层间差异不显著 ($p > 0.05$)。结果表明土壤腐殖质含量在剖面上呈下降趋势, 生物结皮对结皮层土壤腐殖质积累和性质的影响最为直接, 而对结皮层以下土壤影响不显著。

表 2 不同植被群落生物结皮土壤有机 C、腐殖物质组分和特性

Table 2 Soil organic carbons, components and qualities of soil humic substances of biological soil crusts in different vegetation types

分层	样地	有机 C (g/kg)	腐植酸 C 量 (g/kg)	各组分含 C 量 (g/kg)			各组分所占比例 (%)			HA/FA
				HA	FA	HM	HA	FA	HM	
结皮层	F8	11.36 B	4.90 B	1.49 B	3.41 B b	6.47 B b	13.03	30.02	56.96	0.43
	F12	8.40 C	3.66 B	1.42 B	2.23 B c	4.74 B c	16.48	27.95	55.57	0.70
	F16	19.65 A	9.42 A	3.70 A	5.72 A a	10.23 A a	18.82	29.11	52.07	0.65
	F32	8.95 C	3.72 B	1.23 B	2.45 B bc	5.23 B bc	13.74	27.82	58.84	0.63
0~2 cm	F8	5.53 B b	3.18 B b	1.07	2.12 B	2.35 B	19.16	36.64	44.20	0.60
	F12	4.12 B c	1.97 B bc	0.59	1.44 B	2.10 B	13.86	35.98	50.16	0.50
	F16	13.69 A a	6.70 A a	1.61	5.09 A	7.00 A	12.21	36.81	50.98	0.37
	F32	4.72 B bc	1.52 B c	0.43	1.09 B	3.20 B	9.53	23.46	67.01	0.41
2~5 cm	F8	4.45 B	2.15 B	0.55	1.60 AB b	2.30 b	12.44	36.04	51.52	0.34
	F12	3.86 B	1.10 B	0.32	0.78 B c	2.77 ab	7.96	20.92	71.11	0.41
	F16	6.75 A	2.99 A	0.74	2.25 A a	3.76 a	10.96	33.33	55.71	0.34
	F32	4.20 B	1.35 B	0.30	1.05 B bc	2.85 ab	7.20	24.55	68.25	0.29

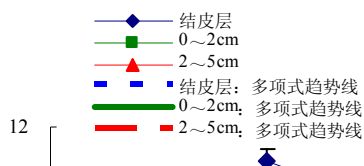
注：表中不同大写字母表示同一土层样地间的差异达 $p < 0.01$ 水平，不同小写字母表示同一土层样地间的差异达 $p < 0.05$ 水平。

结皮层腐殖质组分含量平均值变化范围分别为 HA (1.23 ~ 3.70 g/kg)、FA (2.23 ~ 5.72 g/kg) 和 HM (4.74 ~ 10.23 g/kg)。不同年限之间土壤腐殖质组分含量的差异显著性检验结果表明 (表 2)，不同年限生物结皮土壤腐殖质各组分在不同土层含量的差异不同。在结皮层，退耕 16 年样地生物结皮影响下的土壤腐殖质各组分含量均最高，与其他样地间达极显著差异 ($p < 0.01$)，而 8 年样地和 32 年样地与 12 年样地在 FA 和 HM 含量上差异达显著水平 ($p < 0.05$)；在 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 5 cm 土层，FA 和 HM 含量在各年限样地间差异呈显著或极显著水平，而 HA 含量在各年限间差异已不显著。土壤腐殖质各组分所占比例呈现出：HM > FA > HA；不同年限生物结皮影响下的土壤腐殖质含量总体表现出：16 年 > 8 年 > 32 年 > 12 年，这种差异可能是生物结皮微生物的组成不同、植被演替不同阶段优势种的巨大差异及腐殖质受降雨冲刷流失风险加大^[11]等方面综合影响的反映，它表明退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质随时间变化呈非线性变化趋势。不同年限样地间 HA/FA 比值差异不显著，HA/FA 平均值变化范围为 0.34 ~ 0.70，低于 1，说明生物结皮影响下的土壤腐殖质胡敏酸含量不高，腐殖酸以富啡酸为主。

2.2 不同年限生物结皮腐殖酸的光学特性

在腐殖物质的研究中常用紫外-可见光吸收光谱 E4/E6 比值来表征腐殖酸的腐殖化、团聚化程度和分

子量的大小。E4/E6 比值是腐殖物质分子量的特征函数，与表观分子量对数呈负相关，与溶液浓度无关；低分子量的腐殖酸组分中含有更多的有感光性的荧光团和发色团 (羧基和芳香族等官能团)^[24-25]。当 E4/E6 值越大，表示腐殖酸组分的分子量较小，分子中芳香环的缩合度和芳构化度较大。生物结皮影响下的土壤腐殖酸 E4/E6 值土层间存在一定差异 ($P < 0.5$) 水平。如图 1 所示，生物结皮影响下的土壤腐殖酸 E4/E6 值平均值变化范围为 4.60 ~ 10.76；8 年、12 年和 16 年的生物结皮影响下的土壤腐殖酸 E4/E6 值基本由结皮层向下逐渐减小，但 32 年的生物结皮影响下的土壤腐殖酸 E4/E6 值表现为结皮层低于下层；结皮层土壤腐殖酸 E4/E6 值随时间变化表现出“抛物线”型变化趋势，即 E4/E6 值随结皮生长前期 (16 年以上) 增长，后期下降的趋势；而 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 5 cm 土层土壤腐殖酸 E4/E6 值随时间变化表现出缓慢增长的趋势。这表明生物结皮的前期生长有利于土壤腐殖质芳构化度提高，后期对土壤腐殖质芳构化度的贡献作用可能减弱；生物结皮有利于结皮下层土壤腐殖质芳构化度提高，在 0 ~ 5 cm 土层中，这种影响随土层向下而降低。由上可鉴，有关生物结皮如何影响土壤腐殖酸 E4/E6 值变化的原因还需进一步深入研究。



2.3 生物结皮腐殖质组分和土壤养分因子间线性回归关系

由前面分析可知, 生物结皮对结皮层土壤腐殖质积累和性质的影响最大; 因此, 本文以结皮层数据对土壤腐殖质含量与其他养分因子进行相关分析(表3)。结果表明腐殖质各组分与土壤养分因子的全N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和有效Zn之间呈线性正相关性密切(可达极显著水平, $p < 0.01$); 而腐殖质各组分与有效K、有效Cu、有效Mn和有效Fe之间的相关性较弱(总体为 $p > 0.05$ 水平); 其中腐殖质各组分与有效Cu和有效Mn间呈线性负相关关系(胡敏素和胡敏酸与有效Cu除外, 它们为线性正相关关系)。这表明结皮层土壤腐殖质与一些土壤养分因子间联系密切, 尤其是土壤N素和有效Zn。

表3 生物结皮土壤腐殖质组成与养分因子的相关关系

Table 3 Correlation between components of soil humic substances and soil nutrients

	腐殖酸	胡敏酸	富啡酸	胡敏素	全 N	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	有效 K	有效 Cu	有效 Zn	有效 Mn	有效 Fe
有机 C	0.934**	0.813**	0.841**	0.922**	0.9745**	0.9045**	0.789**	0.582**	0.005**	0.961**	-0.524	0.583*
腐殖酸		0.841**	0.922**	0.723**	0.962**	0.814**	0.732**	0.500	-0.090	0.958**	-0.561*	0.625*
胡敏酸			0.566*	0.661**	0.780**	0.762**	0.710**	0.393	0.080	0.809**	-0.326	0.508
富啡酸				0.628*	0.907**	0.696**	0.607**	0.481	-0.195	0.880**	-0.622*	0.589*
胡敏素					0.843**	0.867**	0.734**	0.583*	0.107	0.821**	-0.406	0.451

注: ** 表示 $p < 0.01$ 显著相关, * 表示 $p < 0.05$ 显著相关。

2.4 生物结皮土壤腐殖质组分与养分因子的回归关系

生态系统中N素和C素的变化是密切相关的^[26]。生物结皮是生态系统中同时具有固定N素和C素功能^[13,26]的一类生物因素。Zn既可作为酶的金属组分, 也可作为酶在结构功能及调节方面的辅助因子, 是植物体内蛋白质、核酸、激素代谢、光合作用和呼吸作用所必需的^[27]。本研究中结皮层土壤腐殖质组分HA、FA和HM含量的变化与全N、有效Zn、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量间存在多种极显著的函数回归正相关关系($p < 0.01$), 其中二项式的函数回归关系拟合最好。图2所示, 结皮层土壤腐殖质组分HA、FA和HM含量的变化与全N、有效Zn、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量间的变化趋势是存在一定差异的。总体上, 结皮层土壤腐殖质组分HA、FA和HM含量的变化与全N、有效Zn、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量间的二项式的函数回归关系表现出: 全N > 有效Zn > NO_3^- -N > NH_4^+ -N, 即土壤全N与土壤腐殖质组分间的建立相关关系最具

代表性, 其次是有效Zn、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N。结果表明生物结皮对土壤C素和N素和有效Zn的影响密切相关。

3 结论

(1) 土壤腐殖质组分HA、FA和HM含量存在明显层次差异, 结皮层 > 0~2 cm 土层 > 2~5 cm 土层, 且结皮层与下层的差异达极显著水平($p < 0.01$), 0~2 cm 与 2~5 cm 土层间差异不显著。生物结皮对结皮层土壤腐殖质积累和性质的影响最为直接, 土壤腐殖质含量由结皮层向下呈下降趋势。不同年限生物结皮影响下的土壤腐殖质含量总体表现出: 16年 > 8年 > 32年 > 12年, 它表明退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质含量随时间变化呈非线性变化趋势; HA/FA 平均值变化范围为0.34~0.70, 低于1, 该区生物结皮影响下的生物结皮的土壤腐殖质胡敏酸含量不高, 腐殖酸以富啡酸为主。

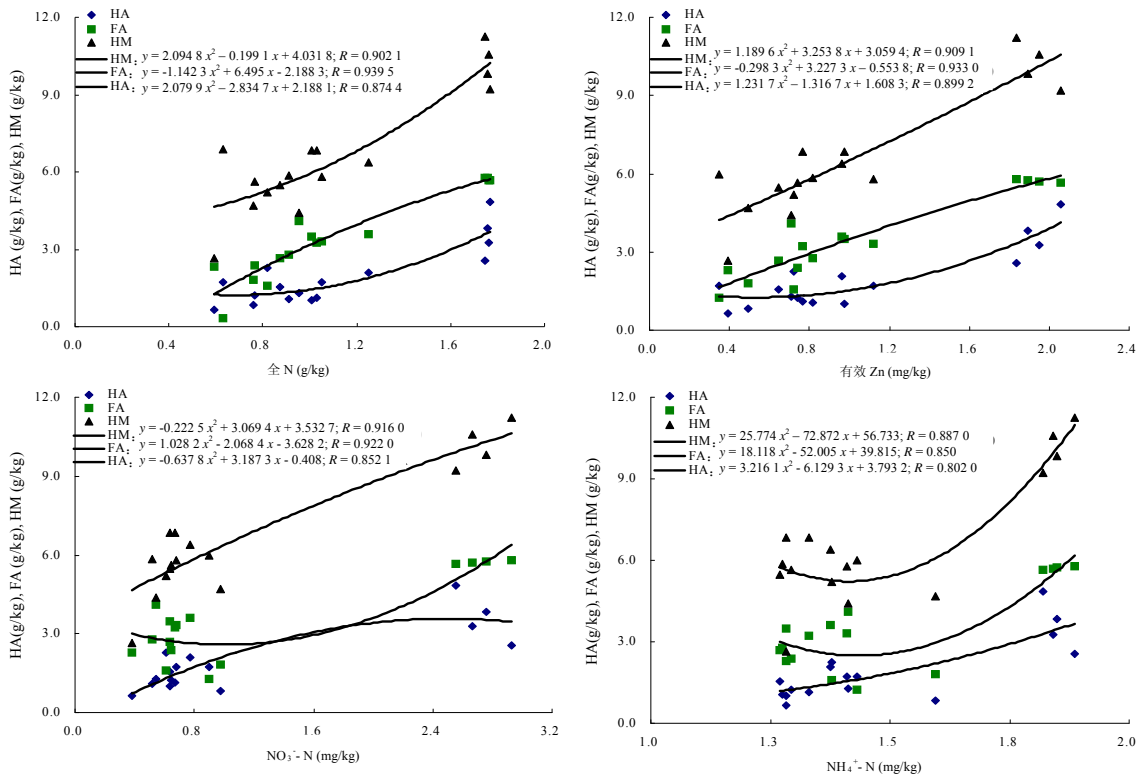


图 2 结皮层土壤HA、FA、HM含量与全N、有效Zn、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的回归关系

Fig. 2 Regression relationship between HA, FA, HM and TN contents, available zinc, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen in biological soil crusts layer

(2) 结皮层土壤腐殖酸E4/E6 值随时间变化表现出“抛物线”型变化趋势；而 0~2 cm 和 2~5 cm 土层土壤腐殖酸E4/E6 值随时间变化表现出缓慢增长的趋势。这表明生物结皮的前期生长有利于土壤腐殖质芳构化度提高，后期对土壤腐殖质芳构化度的贡献作用可能减弱；生物结皮有利于结皮下层土壤腐殖质芳构化度提高，在 0~5 cm 土层中，这种影响随土层向下而降低。

(3) 腐殖质组分与土壤养分因子的全 N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和有效 Zn 之间存在线性相关性关系。这表明结皮层土壤腐殖质与一些土壤养分因子间联系密切，尤其是土壤 N 素和有效 Zn。

(4) 结皮层土壤腐殖质组分 HA、FA 和 HM 含量的变化与全 N、有效 Zn、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量间的二项式的函数回归关系表现出：全 N > 有效 Zn > NO₃⁻-N > NH₄⁺-N。结果表明生物结皮对土壤 C 素、N 素和有效 Zn 的影响密切相关。

参考文献:

[1] West NE. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179–223

[2] Belnap J, Harper KT, Warren SD. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: Nitrogenase activity, chlorophyll content, and chlorophyll degradation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8: 1–8

[3] Orlovsky L, Dourikov M, Babaev A. Temporal dynamics and productivity of biogenic soil crusts in the central Karakum desert, Turkmenistan. *Journal of Arid Environments*, 2004, 56: 579–601

[4] Thompson DB, Walker LR, Landau FH, Stark LR. The influence of elevation, shrub species, and biological soil crust on fertile islands in the Mojave Desert, USA. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61, 609–629

[5] Belnap J. The world at your feet: Desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1: 181–189

[6] Eldridge DJ, Greene RS. Microbiotic soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australia Journal of Soil Research*, 1994, 32: 389

[7] MacCarthy P. The principles of humic substances. *Soil Science*, 2001, 166: 738–751

[8] 刘建新, 王鑫, 杨建霞. 覆草对果园土壤腐殖质组成和生物学特性的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 93–95

[9] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结

- 皮理化性状初报. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 张健, 刘国彬, 许明祥, 薛箴, 刘江华. 黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 14-20
- [13] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biological Fertility Soils*, 2002, 35: 128
- [14] Belnap J, Gillette DA. Disturbance of biological soil crust: Impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degeneration Development*, 1997, 8: 355-362
- [15] Zhang YM, Wang HL, Wang XQ, Yang WK, Zhang DY. The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantungut Desert of Northwestern China. *Geoderma*, 2006, 132: 441-449
- [16] Verrecchia E, Yair A, Kidron GJ, Verrecchia K. Physical properties of the psammophile microbiotic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, northwestern Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29: 427-437
- [17] Eldridge DJ, Zaady E, Shachak M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. *Catena*, 2000, 40: 323-336
- [18] Su YG, Li XR, Cheng YW, Tan HJ, Jia RL. Effects of biological soil crusts on emergence of desert vascular plants in North China. *Plant Ecology*, 2007, 191: 11-19
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 136-149
- [20] 刘光崧主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [21] Ivarsson H, Jansson M. Temporal variations in the concentration and character of dissolved organic matter in a highly colored stream in the coastal zone of Northern Sweden. *Arch. Hydrobiology*, 1994, 132: 45-55
- [22] Kang KH, Shin HS, Park H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. *Water Research*, 2002, 36: 4023-4032
- [23] Klavins M, Apsite E. Sedimentary humic substances from lakes in Latvia. *Environment International*, 1997, 23(6): 783-790
- [24] Christl I, Knicker H, Kögel-Knabner I, Kretzschmar R. Chemical heterogeneity of humic substances: Characterization of size fractions obtained by hollow-fibre ultrafiltration. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 617-625
- [25] Richard C, Guyot G, Aguer JP, Ter Halle A, Trubetskaya OE, Trubetskoi OA. Role of fractionation in studying the photochemical properties of humic substances. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, 78(11): 2265-2272
- [26] Housman DC, Powers HH, Collins AD, 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: 620-634
- [27] 张福锁. 锌在植物细胞原生质膜稳定性方面的作用. *土壤学报*, 1993, 30(增刊): 104-110

Influence of Biological Soil Crusts on Soil Humus in Rehabilitated Grassland of Hilly Loess Region, China

ZHANG Jian^{1,3}, LIU Guo-bin^{1,2}, XU Ming-xiang^{1,2}

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;*

2 *Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: This paper focuses on the characteristics of soil humus components and their changing tendency influenced by biological soil crusts in the rehabilitated grassland of the hilly loess region. The results showed that: 1) There was clear hierarchical characteristics of the distributions of humic acid, fulvic acid and humin content of the soil humus components influenced by biological soil crusts, all in the order of the crust layer > 0 ~ 2 cm layer > 2 ~ 5 cm layer. Humus contents of different years showed an overall order of 16a > 8a > 32a > 12a. Soil humus content changed non-linearly with the time. HA/FA changed in the average range of 0.34 ~ 0.70. Humic acid in the humus content was not high, influenced by biological soil crusts in this area. Fulvic acid is the main composition of soil humic acids. 2) In the crust layer, E4/E6 values of soil humic acids mainly performed as a “parabolic curve” type with the time, while in 0 ~ 2 cm and 2 ~ 5 cm layers, E4/E6 values of soil humic acids showed a slow increasing trend. 3) There was very significant linear correlations ($p < 0.01$) between soil humus components and soil nutrients, including total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and available zinc. 4) There was a very significant binomial function regression correlation between soil humus component content and total nitrogen content, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen as well as available zinc. It showed the close relation among the influences on soil carbon, nitrogen or available zinc by biological soil crusts.

Key words: Biological soil crusts, Humus, Rehabilitated grassland, Hilly loess region