

黄土丘陵区草地土壤微生物 C、N 及呼吸熵对植被恢复的响应

黄懿梅¹, 安韶山², 薛虹¹

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

摘要: 以野外样地调查和室内分析法研究了黄土丘陵区不同植被恢复年限下草地土壤微生物 C、N 及土壤呼吸熵的变化。结果表明, 土壤微生物量碳明显地随着植被恢复年限的增加而增加。在恢复前 23a, 土壤微生物量碳在 0~20 cm 土层年增加率为 24.1%; 20~40 cm 为 104.4%。植被恢复 23a 后, 0~20 cm 土层增长率为 0.83%, 20~40 cm 为 0.19%。土壤微生物量 N 表现为在植被恢复的初期略有下降, 3a 后, 开始出现明显增加。0~20 cm 土层年增长率为 20.14%, 20~40 cm 为 15.11%。在植被恢复 23a 后, 0~20 cm 土层的年增长率为 0.14%, 20~40 cm 变化不大。土壤微生物呼吸强度随着恢复年限的增加逐渐加强; 土壤呼吸熵随植被封育时间的增加而呈对数降低趋势。土壤呼吸熵 (qCO_2) 在反映土壤的生物质量变化时, 显得更加稳定, 受植物生长状况影响较小。相关分析表明, 土壤微生物量和土壤微生物活性与土壤有机质、碱解氮和粘粒含量显著正相关; 与土壤粉粒含量明显负相关; 表层土壤 pH 值对其也有明显影响。草地植被自然恢复过程可增加土壤微生物活性, 有利于土壤质量的提高。

关键词: 土壤微生物碳、氮; 草地土壤; 植被恢复; 土壤基础呼吸; 土壤呼吸熵; 黄土丘陵区

文章编号: 1000-0933 (2009) 06-2811-08 中图分类号: Q142, Q945, Q948 文献标识码: A

Responses of soil microbial biomass C and N and respiratory quotient (qCO_2) to revegetation on the Loess Hilly-Gully region

HUANG YiMei¹, AN Shao-Shan², XUE Hong¹

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (6): 2811 ~ 2818

Abstract: Vegetation recovery in the Loess Plateau of China has been identified as the most effective and useful way to alleviate soil erosion and degradation. This study was to examine the responses of soil microbial indicators to natural vegetation rehabilitation on the Loess Plateau. Soil samples at the depths of 0—20 cm and 20—40 cm were collected from the Yunwu mountain grassland area with an recovered chronosequence of 0, 3, 9, 15, 23, 58, 73, and 78 years. The results showed that microbial biomass C (MBC) was increased significantly along with vegetation rehabilitation time increasing. In the early 23 years revegetation sites, the increasing MBC rate was 24.1% and 104.4% every year at 0—20 cm and 20—40 cm, respectively. However, after 23 years of revegetation, the increasing rate of MBC was only 0.83% and 0.19% at 0—20 cm and 20—40 cm every year, respectively. Soil MBN also increased faster during the first 23 years with increasing rates of 20.14% and 15.11% at the 0—20 cm and 20—40 cm every year, respectively. Soil basal respiration (SBR) increased gradually during the vegetation natural succession. The qCO_2 decreased with a logarithm functional trend with the enclosed time increased. Compared to soil respiration intensity, the qCO_2 reflected the change of microbial activity

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40701095); 国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目 (2006BCA01A07); 陕西省自然科学基金资助项目 (2007D12)

收稿日期: 2008-09-25; 修订日期: 2008-12-30

* 通讯作者 Corresponding author E-mail:

<http://www.ecologica.cn>

more clearly and consistently. The MBC, MBN and SBR had a positive relationship with soil organic carbon, available nitrogen and clay contents, but they had a negative relationship with soil silt content. In addition, soil pH at the surface layer also affected the soil microbial properties. These research results reinforced the notion that natural succession of grassland has altered positively soil microbial communities and activities in the surface layer, provided indications that vegetation restoration can have positive impacts on soil microbial quality on the Loess Plateau.

Key Words: soil microbial biomass C and N; grassland soil; revegetation; soil basal respiration (SBR); soil respiratory quotient ($q\text{CO}_2$); Loess Hilly-Gully region

黄土丘陵区是我国乃至世界上严重的水土流失地区之一,也是国家退耕还林还草及生态建设的重点区域。恢复植被是黄土高原生态环境治理与水土保持的重要措施,植被恢复能有效减少土壤侵蚀、改善和提高土壤质量^[1,2]。土壤肥力质量的恢复、保育和定向培育是生态环境建设的重要内容,研究生态恢复与土壤质量演变耦合机理,对区域生态环境建设及土壤质量定向培育,解决人类面临的资源环境问题有重要理论和现实意义^[3,4]。土壤微生物对环境变化敏感,微生物量库的任何变化,都会影响土壤养分的循环和有效性^[5],能够较早地指示生态系统功能的变化。近年来,随着土壤微生物生物量测定方法的不断改进和简化,土壤微生物生物量研究领域更加深入^[6,7]。目前,对黄土高原侵蚀环境条件下植被恢复后的土壤质量演变虽然已有了一些研究,但大多集中于植被恢复后土壤理化性质的演变,对土壤微生物量这种更加灵敏的指标报道甚少。本文旨在从土壤微生物学角度研究侵蚀环境下不同植被恢复后土壤微生物 C、N及土壤基础呼吸的演变,揭示植被恢复与重建对改善土壤生态环境的作用机制,为黄土高原植被恢复措施优选及土壤质量恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

云雾山草原自然保护区位于宁夏回族自治区固原县东北部,东经 106°25' ~ 106°29',北纬 36°14' ~ 36°20',南北长 11 km,东西宽 5.5 km,总面积约 4000 hm²,除村庄、道路和农田外,可保护草原面积 3400 hm² (包括 133 hm² 灌丛)。该区为黄土覆盖的低山丘陵区,海拔 1800 ~ 2148 m,大部分在 2000 m 以下。气候年均温度 4 ~ 6 °C,1月均温 -14 °C,7月均温 22 ~ 25 °C,无霜期 112 ~ 137 d,年均降水量 400 ~ 450 mm。土壤为山地灰褐土和浅泸黑土。保护区划分为核心区、缓冲区和试验区 3 部分:核心区面积 1130 hm²,居保护区中偏北部;缓冲区 1000 hm²,在保护区南端;试验区 1879 hm²,从保护区南端起沿南、东、北 3 面围于核心区和缓冲区之外。此外,在保护区外还有 500 hm² 的外围保护地带^[8]。保护区植物以草原植物为主,包括长芒草、里茅委陵菜、百里香、铁杆蒿群落等,主要分布在保护区的中心地带海拔 1800 ~ 2120 m 的阳坡,半阳坡,半阴坡及梁顶。

1.2 供试材料

本研究采用“时空互代法”,选择宁夏固原云雾山自然保护区植被恢复过程中不同恢复年限下的 8 个地段作为研究样地,CK 为农田,其余均为草地(表 1)。于 2006 年 7 月采集 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 两层土样,在面积大约为 100 m × 100 m 的样地内,采用“S 型多点采集混和样”,野外重复两次,用塑料自封袋带回实验室。新鲜土样采回后,过 2 mm 筛,分成两份,一份于 4 °C 保存,一份风干备用,新鲜样品用于土壤微生物指标测定,风干样用于土壤理化性质测定。

1.3 分析项目与方法

1.3.1 土壤基础呼吸测定

采用改进的室内密闭培养法^[9],称取相当于 40 g 烘干基的新鲜土样于 500 ml 广口瓶中,调节土壤含水量为田间持水量的 50%;将盛有 5 ml 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的吸收瓶小心悬挂在土壤的上方。密封广口瓶的瓶口后于 (25 ± 1) °C 恒温培养 24 h,将 NaOH 完全转移于 100 ml 三角瓶中,加入 1 mol·L⁻¹ BaCl₂ 2 ml 和酚酞指示剂 2 滴,用 0.05 mol·L⁻¹ 的标准盐酸滴定至红色消失。同时,以 20 ml 蒸馏水作为对照。每个处理重复 3 次。

根据 NaOH 溶液的消耗量计算出 CO₂ 释放量。

表 1 供试土样与植被的基本情况

Table 1 Soil natural characteristics and the relationship with plant recover time

编号 Sample No	恢复年限 Rehabilitation time (a)	优势种 Dominant species	主要伴生种 Accompanying species	海拔 (m) Elevation	坡度 (°) Slope gradient
1	78	大针茅 <i>Stipa grandis</i> P. Smim	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> Willd 星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i> L. 花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i> (Linn.) Trautv 窄裂委陵菜 <i>Potentilla angustiloba</i> Yu et Li	2020	12
2	73	长芒草 <i>Stipa bungana</i> Trin Ledeb	铁杆蒿 <i>Artemisia sacronum</i> Ledeb 百里香 <i>Thymus mongolicus</i> Ronn 赖草 <i>Leymus secalinus</i> 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	2040	15
3	58	铁杆蒿 <i>Artemisia sacronum</i> 长芒草 <i>Stipa bungana</i>	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	2040	10
4	23	百里香 <i>Thymus mongolicus</i> 长芒草 <i>Stipa bungana</i>	大针茅 <i>Stipa grandis</i> 铁杆蒿 <i>Artemisia sacronum</i> . 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> Linn	2040	10
5	15	百里香 <i>Thymus mongolicus</i> 长芒草 <i>Stipa bungana</i>	白颖苔草 <i>Carex rigescens</i> (Franch.) V. Krecz 花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i> (Linn.) Trautv 糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberimus</i> Bunge	1940	11
6	9	香茅草 <i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel 百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	1908	10
7	3	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> Waldst et Kit 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 百里香 <i>Thymus mongolicus</i> 长芒草 <i>Stipa bungana</i>	1940	2
8	CK	玉米 Maize		1908	2

1.3.2 土壤微生物生物量碳、氮的测定

调节各供试土壤的含水量为田间持水量的 55% 左右,并在 (25 ± 1) °C 下通气培养 1 周^[10]。称取适量土样 6 份,分别置入直径 9cm 的培养皿中,3 份熏蒸,3 份不熏蒸。将欲熏蒸土样置于内径 29cm 可抽气的干燥器内隔板上。干燥器底部放置盛有 50ml 色谱纯氯仿和若干玻璃珠 (防止暴沸) 的小烧杯,同时放入装有 50ml 氢氧化钠溶液的小烧杯和几张用水湿润的滤纸。用少量凡士林密闭干燥器,随之抽气,氯仿沸腾 5min 停止抽气,关闭干燥器阀门,在 25 °C 暗处放置 24h。取出干燥器底部放置的东西,清洁干燥器,反复抽真空直到土壤无氯仿味为止。至残留在土壤中的氯仿抽尽。不熏蒸土样置入另一干燥器中,以蒸馏水代替氯仿,与氯仿熏蒸一样处理,作为对照土壤^[11]。

将熏蒸过的土样转移至 150ml 三角瓶中,加入一定体积的 0.5mol·L⁻¹ K₂SO₄ (土:水 = 1:4),振荡 30min 后过滤。同时做 3 个无土壤空白。浸提液立即测定或在 -18 °C 下保存。

微生物量氮采用修正了的过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[12,13]。浸提液用 0.15mol·L⁻¹ NaOH 和 30g·L⁻¹ K₂S₂O₈ 组成的碱性氧化剂氧化,氧化剂和样品的体积比为 1:1,氧化条件是高压锅 (120 ~ 124 °C) 氧化 30min。到达规定时间后取出,冷却至室温后测定吸光度 A₂₂₀ 和 A₂₇₅ 并计算全氮含量。微生物生物量氮 (B_N) 按照下面公式计算: $B_N = E_N / K_{EN}$, 式中: E_N 为熏蒸与未熏蒸土样全氮的差值 (mg·kg⁻¹), K_{EN} 为熏蒸杀死的微生物中氮被 K₂SO₄ 所提取的比例,取 0.54^[13]。

微生物量碳用 TOC 自动分析仪测定,浸提液稀释适当倍数后用 TOC 自动分析仪测定有机碳。微生物生物量碳 (B_C) 按照下面公式计算: $B_C = E_C / K_{EC}$, 式中: E_C 为熏蒸与未熏蒸土样全碳的差值 (mg·kg⁻¹), K_{EC} 为熏蒸杀死的微生物中碳被 K₂SO₄ 所提取的比例,取 0.45^[14]。

1.3.3 土壤基本理化性质测定与数据分析

土壤理化性质分析参照文献^[15],有机碳用 $K_2C_2O_7-H_2SO_4$ 外加加热法,pH值用酸度计法,碱解氮用扩散吸收法,速效磷用碳酸氢钠法,土壤机械组成用吸管法。数据处理采用 DPS软件进行方差分析和 LSD法多重比较^[16]。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质的演变

随着植被恢复年限延长,0~20 cm和 20~40 cm土壤有机碳含量基本上均呈现增加的趋势,个别年份异常(表 2,表 3)。与对照相比,0~20 cm和 20~40 cm土壤有机碳含量在各恢复阶段的年均增加率变化分别在 0.4%~4.0%和 -0.01%~5.0%之间,植被恢复的前 9a(0~20 cm)或 15a,土壤有机碳增长速率相对较低,高峰期均出现在恢复的 15~23a间,随后其累计速率趋缓,年均增长率在 2.1%以下。土壤碱解氮含量的快速累积期在植被恢复的前 3a,0~20 cm和 20~40 cm土层的年均增加速率分别为 31.9%和 23.1%,以后速度有所减缓,平均为 5.0%和 5.1%;上层土壤增加量高于下层土壤;两土层在恢复的 23~73a间土壤碱解氮变化不明显,没有达到显著差异。

不同植被恢复阶段,土壤速效磷和砂粒含量的变化没有明显的规律:土壤速效磷基本呈现出在恢复的第 3年略有下降,后缓慢恢复,至 23a(0~20 cm)或 15a(20~40 cm)又呈现缓慢的下降趋势。土壤粘粒含量基本上随着植被恢复年限的延长而呈增加的趋势,但不显著;土壤粉粒含量随着植被恢复年限的延长而呈显著的降低;土壤 pH随植被恢复年限增加也呈降低,亦不显著。

表 2 土壤 0~20 cm 基本理化性质

Table 2 Physico-chemical properties of the experimental soils (0~20 cm)

恢复年限 Revegetation years(a)	有机碳 O. C ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Av-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷 Av-P ($mg \cdot kg^{-1}$)	机械组成 Texture ($g \cdot kg^{-1}$)			pH
				黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	
				<0.002mm	0.2~0.002mm	>0.2 mm	
CK	10.93 ± 0.04 g	57.77 ± 0.56 f	4.25 ± 0.21 a	140.2	228.7	563.1	8.10 a
3	11.22 ± 0.08 fg	113.00 ± 5.51 d	2.51 ± 0.16 cd	173.2	266.6	462.4	8.02 bc
9	11.37 ± 0.16 f	91.00 ± 3.18 e	2.63 ± 0.01 c	303.7	208.4	489.5	7.97 def
15	16.73 ± 0.15 e	140.11 ± 3.42 c	3.07 ± 0.01 b	312.8	195.7	493.2	8.00 bcd
23	20.93 ± 0.08 d	149.35 ± 5.06 b	3.15 ± 0.04 b	291.9	177.0	532.4	7.99 cde
58	21.32 ± 0.11 c	150.25 ± 4.71 b	2.68 ± 0.03 c	250.3	172.7	578.8	8.03 b
73	22.36 ± 0.03 b	150.81 ± 1.36 b	3.13 ± 0.15 b	260.6	194.1	546.3	7.96 ef
78	25.32 ± 0.23 a	159.00 ± 1.16 a	2.45 ± 0.03 d	275.4	187.4	538.5	7.95 f

表 3 土壤 20~40 cm 基本理化性质

Table 3 Physico-chemical properties of the experimental soils (20~40 cm)

恢复年限 Revegetation years(a)	有机碳 O. C ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Av-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷 Av-P ($mg \cdot kg^{-1}$)	机械组成 Texture ($g \cdot kg^{-1}$)			pH
				黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	
				<0.002mm	0.2~0.002mm	>0.2 mm	
CK	7.65 ± 0.07 e	46.32 ± 1.05 f	2.61 ± 0.14 ab	138.7	269.9	512.6	8.13 a
3	8.46 ± 0.04 e	78.44 ± 0.67 d	2.03 ± 0.12 d	162.0	297.3	430.4	8.03 bc
9	7.65 ± 0.08 e	68.34 ± 2.95 e	2.42 ± 0.05 bc	329.3	198.1	473.9	8.00 c
15	10.33 ± 0.18 d	118.42 ± 0.45 c	2.77 ± 0.17 a	297.7	175.7	528.6	8.03 bc
23	16.53 ± 0.37 c	120.33 ± 3.56 c	2.08 ± 0.12 d	323.4	170.3	507.2	8.01 bc
58	16.89 ± 0.88 bc	128.31 ± 1.24 b	1.91 ± 0.04 d	228.8	140.1	632.6	8.05 b
73	18.55 ± 0.47 a	121.06 ± 4.37 c	2.17 ± 0.16 cd	323.3	163.6	514.7	8.02 bc
78	17.63 ± 0.51 ab	134.51 ± 2.18 a	2.04 ± 0.04 d	287.2	181.6	532.4	8.01 bc

The letters in the different columns showed the multiple comparison of LSD; Different letter means significant difference between two treatments ($p < 0.05$)

2.2 不同植被演替阶段土壤微生物生物量碳、氮的演变

在草地植被自然恢复的过程中,土壤微生物量总体上表现出随植被恢复时间的增加而呈显著的对数增大的趋势,在植被恢复的前 23a 增加速率较快,23a 后缓慢增加(图 1、2)。两个土层内微生物量的变化趋势基本一致,但随着植被封育时间的延长,两个层次含量的差距拉大。

在草地植被自然恢复的不同阶段,土壤微生物量碳发生了显著的变化,总体上随着植被恢复年限的增加呈显著地对数增加趋势(图 1)。在前 23a,0~20 cm 土层年增长率为 24.1%;20~40 cm 为 104.4%。23a 后,0~20 cm 土层年增长率为 0.83%,20~40 cm 为 0.19%/a。

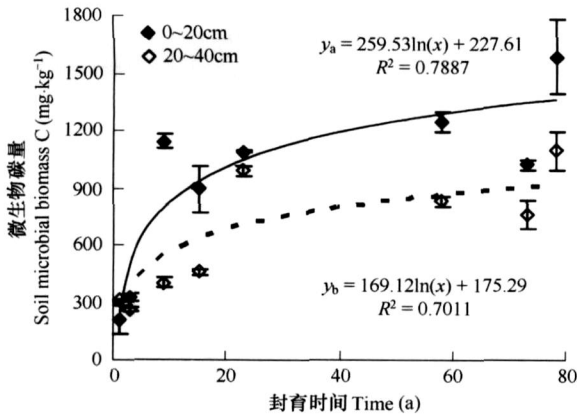


图 1 不同植被演替阶段土壤微生物体碳变化

Fig. 1 Changes of SMB C in different plant succession stages

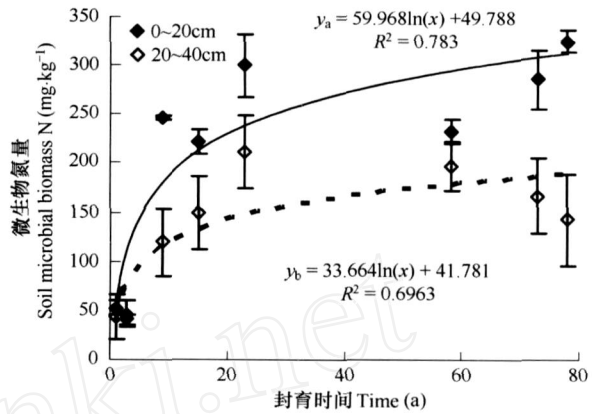


图 2 不同植被演替阶段土壤微生物体氮变化

Fig. 2 Changes of SMB N in different plant succession Stages

土壤微生物量氮总体上也是随着植被恢复年限的增加而增加(图 2)。在 3 至 23a 间,0~20 cm 土层的年增长率 20.14%;20~40 cm 为 15.11%。而在 23a 后,0~20 cm 土层的年增长率为 0.14%,20~40 cm 增长不明显。

2.3 不同植被演替阶段土壤微生物呼吸和微生物呼吸熵的变化

植被恢复不同年限下土壤的呼吸强度不同,在两个土层中,都表现出植被封育 73a 最高,然后是 58a 或 78a,23a 也较高,植被恢复当年最低。土壤微生物呼吸总体上也是随着植被封育时间的延长呈对数增加趋势,在 23a 前,0~20 cm 和 20~40 cm 土层中土壤微生物呼吸的年增长率分别为 3.19% 和 2.49%;23a 后,分别为 0.29% 和 0.03%。0~20 cm 明显高于 20~40 cm 土层的值(图 3)。

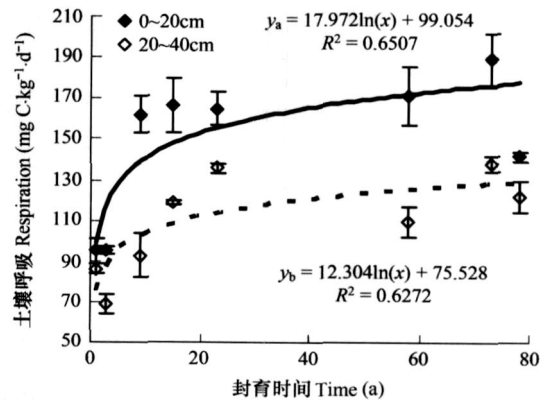


图 3 不同植被演替阶段土壤微生物呼吸强度变化

Fig. 3 Changes of SBR in different plant succession stages

土壤呼吸熵(respiration quotient),又称微生物的代谢熵(qCO_2),为某一时刻 CO_2 释放速率与 MBC 的比,或基础呼吸与微生物量碳之间的比率,反映了单位生物量的微生物在单位时间里的呼吸强度,它可以同时表示微生物量的大小和活性^[17],并将微生物生物量和微生物的活性以及功能联系起来。微生物呼吸熵随植被封育时间的增加呈显著的对数降低关系(图 4)。在前 23a,0~20 cm 和 20~40 cm 土层中微生物呼吸熵的年降低率分别为 2.91% 和 2.18%,尤其是封育后的最初 9a 降低速率较快,0~20 cm 土层年降低率为 7.66%。23a 后,两个层次年降低率分别为 0.82% 和 0.37%。

2.4 土壤微生物量碳、氮、呼吸和呼吸熵与理化性质的相关性

草地植被自然恢复过程中土壤生物学性质与理化性质的相关系数分析表明:土壤有机质和碱解氮含量与土壤微生物量碳、氮、呼吸和呼吸熵在两个土层中都呈极显著线性相关关系;速效磷只与呼吸熵显著相关;粘粒含量与4个微生物学指标几乎呈显著正相关关系,而粉粒与它们呈显著负相关关系,砂粒则几乎无明显相关关系;pH值在0~20 cm土层与它们呈极显著负相关关系,在20~40 cm则无明显相关关系(表4)。

3 讨论

土壤微生物体碳是土壤微生物的综合性指标之一,它不仅从总体上反映微生物受环境因子影响的变化,还反映了微生物对环境作用的能力,是土壤有机质库的活跃部分,指示着土壤总有机质的状态与积累情况^[18]。微生物量氮是指活的微生物体内所含有的氮,是有机氮库中的活性部分,它周期短、易矿化,是主要的可矿化氮源,对土壤氮素供应和循环具有重要的意义^[19]。不同土壤类型及生态环境条件下其变异很大。有关研究显示,土壤微生物生物量是衡量生态稳定性的指标之一,同时也可以作为生态环境土壤健康和肥力的指标^[20,21]。本研究结果表明,在植被恢复过程中,土壤微生物体碳、氮呈现随着恢复年限延长而增加的趋势,与土壤有机碳的变化趋势一致,在植被恢复初期,土壤微生物生物量变化更为明显,增加较快,这主要是受植物根系生物量、枯落物生物量增加有关。群落总生物量增加导致了根系密度的变化,在植被恢复初期,主要是一些蒿类植物,年生物量也较小。随着植被演替变化,一些禾本科、豆科植物逐渐得以生长,有利于土壤碳素、氮素的累积^[18,22]。

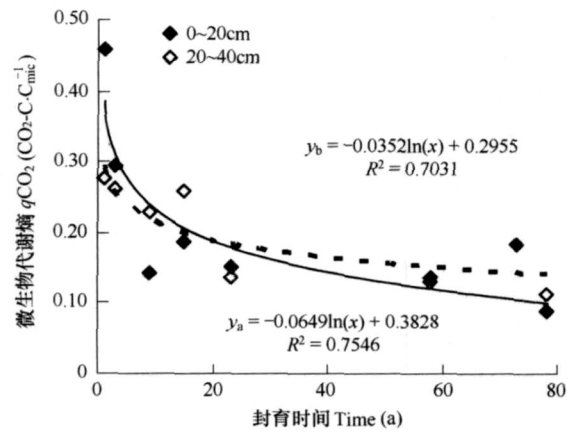


图4 不同植被演替阶段土壤微生物代谢熵变化
Fig 4 Changes of q_{CO_2} in different plant succession Stages

表4 土壤微生物量碳、氮、呼吸和呼吸熵与土壤理化性质的相关系数 $r(n=8)$

Table 4 The relationships among soil microbial parameters and soil chemical and physical properties

项目 Items	层次 Layer (cm)	有机碳 O. C ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Av-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷 Av-P ($mg \cdot kg^{-1}$)	机械组成 Texture ($g \cdot kg^{-1}$)			pH
					黏粒 Clay <0.002mm	粉粒 Silt 0.2~0.002mm	砂粒 Sand >0.2 mm	
SMBC	0~20	0.6143*	0.6554*	-0.2802	0.8302**	-0.8097**	0.2366	-0.6358*
	20~40	0.8195**	0.7837**	-0.1291	0.7542**	-0.8310**	0.4370	-0.4050
SMBN	0~20	0.7816**	0.7227**	-0.5890	0.7882**	-0.8028**	0.2527	-0.7633**
	20~40	0.9148**	0.8256**	-0.5744	0.5259	-0.7265**	0.5260	-0.4203
SBR	0~20	0.8060**	0.7409**	-0.4015	0.8554**	-0.8555**	0.2518	-0.8044**
	20~40	0.7781**	0.8196**	-0.3296	0.7379**	-0.9458**	0.6154*	-0.5107
q_{CO_2}	0~20	-0.6858*	-0.7950**	0.7666**	-0.8641**	0.6793*	0.0272	0.8527**
	20~40	-0.8892**	-0.7829**	0.7183**	-0.4644	0.7112**	-0.5608	0.4451

微生物呼吸强度是衡量土壤微生物总的活性指标^[20]。植被恢复的不同时间对土壤基础呼吸有着明显的影响,土壤呼吸强度随着恢复年限的增加以对数的关系增加。说明随着植被封育时间的增加,土壤微生物总的活性有增加的趋势。根据生态系统演替论,随着时间或生态系统的演替,总的呼吸量与总生物量之比应逐渐降低。 q_{CO_2} 越低,表明其存在的生境越稳定成熟。若土壤的 q_{CO_2} 明显偏高,则表明它是一个被胁迫的不健康土壤,因此,土壤呼吸熵可作为陆地群落胁迫和微生物群落定量变化的一个指标。任何一种干扰都将会增加土壤的 q_{CO_2} ,比较低的 q_{CO_2} 比意味着一种相对未受干扰的土壤生物学功能^[18~21]。任京辰^[23]等的研究结果也显示:农地、退化地和恢复地表层土壤的呼吸熵平均都为未退化地的2倍以上。本研究发现,在草地植

被自然恢复过程中,土壤呼吸熵随植被封育时间的增加而呈对数降低趋势。说明经过多年的植被恢复,土壤生物学功能正在逐步恢复,土壤微生物多样性的受损情况正在逐步减小。土壤呼吸熵在 20~40cm 土层高于 0~20cm,这可能与 q_{CO_2} 对土壤有机物质质量变化反应灵敏有关。这也说明土壤呼吸熵能够很好地反映土壤生态体系的变化。与土壤微生物呼吸相比,呼吸熵在反映土壤的生物质量变化时,显得更加稳定,受植被生长状况的影响较小。

4 结论

(1) 在草地植被自然恢复过程中,土壤微生物量表现出随植被恢复时间的增加而增大的趋势,且在植被恢复的前 23a 增加速率较快,23a 后缓慢增加。在植被恢复的前 23a, 0~20cm 和 20~40cm 土层土壤微生物量碳含量年增长率分别为 24.1% 和 104.4%;土壤微生物量氮(3 至 23a 间)年增长率分别为 20.14% 和 15.11%。23a 后,土壤微生物量碳含量在上下两个土层的年增长率分别为 0.83% 和 0.19%,且两个土层内的变化趋势基本一致;而土壤微生物量氮在 0~20cm 土层的年增长率为 0.14%,下层增长不明显。土壤微生物量可以较为敏感地反映草地植被恢复对土壤性质的影响。

(2) 土壤微生物呼吸强度随着恢复年限的增加呈上升趋势,说明随着植被封育时间的增加,土壤微生物总的活性有增加的趋势。土壤呼吸熵作为反映有机物质的质量和组成,能够很好地反映土壤生态体系的变化。与土壤微生物呼吸相比,呼吸熵在反映土壤的生物质量变化时,显得更加稳定,受作物生长的影响较小。

(3) 土壤有机质、碱解氮和粘粒含量与土壤微生物量碳、氮、呼吸和呼吸熵在两个土层中都呈极显著线性相关关系。草地植被自然恢复过程中,土壤理化性质与微生物性质相互影响,相互促进,使土壤质量逐步得到改善和提高。

References:

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (3): 241—246.
- [2] Zheng F L. Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16 (4): 420—427.
- [3] Wang G L, Liu G B, Hou X L. The Research of Species Diversity after the Vegetation Restoration in Loess Hilly Region. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20 (2): 182—187.
- [4] Yao H Y, He Z L, Huang C Y. Turnover period of microbial biomass nitrogen in red soils and its significance in soil fertility evaluation. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36 (3): 387—394.
- [5] Davidson E A, Ackerman I K. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20: 161—193.
- [6] Wu J S, Xiao H A, Chen G Q, *et al*. Measurement microbial biomass-P in upland soil in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (1): 70—78.
- [7] David S, Jenkinson, Philip C, Brookes, David S, Powlson. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 5—7.
- [8] Zou H Y, Guan X Q. The explored of the management of grassland natural conservation area in Yunwu Mountain. *Practical Science*, 1997, 14 (1): 3—4.
- [9] Li Z G. Measurement of soil respiration. *Analysis of soil agricultural chemistry*. Beijing: China agriculture Sci-Tech Press, 1999: 238—240.
- [10] Ross D J. Measurement of microbial biomass C and N in grassland soils by fumigation - incubation procedures: Influence of inoculum size and control. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22: 289—294.
- [11] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19 (6): 703—707.
- [12] Zhou J B, Li S X. Choosing of a proper oxidizer for alkaline persulfate oxidation to determine total nitrogen in solution. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4 (3): 209—304.
- [13] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soils-V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol Biochem*, 1976, 8: 167—177.
- [14] Wu J, Brookes P C. The proportional mineralisation of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 507—515.
- [15] Nanjing Agriculture University. *Analysis soil agricultural chemistry*. Beijing: Agriculture Press, 1985.

- [16] Tang Q Y, Feng M G. DPS data processing system for practical statistic. Beijing: Science Press, 2002.
- [17] Anderson T H, Domsch K H. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22, 251—255.
- [18] Bastida F, Barbera G G, Garcia C, Hernandez T. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38: 62—70.
- [19] Breue L, Huisman J A, Keller T, Frede H-G. Impact of a conversion from cropland to grassland on C and N storage and related soil properties: Analysis of a 60-year chronosequence. *Geoderma*, 2006, 133: 6—18.
- [20] Insam H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? *Soil Biol Biochem*, 1990, 22 (4): 525—532.
- [21] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicators Kfiging for evaluating soil quality. *Soil Sci Soc Am. J*, 1993, 57: 743—749.
- [22] Cheng J M, Wan H E, Hu X M, *et al*. Accumulation and decomposition of litter in the semiarid enclosed grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (4): 1207—1212.
- [23] Ren J C, Zhang P J, Pan G X. Indices of eco-geochemical characteristics in a degradation-reclamation sequence of soils in Mountainous Karst Area: a case study in Guanling-Zhenfeng Region, Guizhou, China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21 (5): 504—512.

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响. *地理学报*, 1999, 54 (3): 241 ~ 246.
- [3] 王国梁, 刘国彬, 侯喜录. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究. *山地学报*, 2002, 20 (2): 182 ~ 187.
- [4] 姚槐应, 何振立, 黄昌勇. 红壤微生物量氮的周转期及其研究意义. *土壤学报*, 1999, 36 (3): 387 ~ 394.
- [6] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物 P 测定方法研究. *土壤学报*, 2003, 40 (1): 77 ~ 78.
- [8] 邹厚远, 关秀琦, 张信. 云雾山草原自然保护区的管理途径探讨. *草业科学*, 1997, 14 (1): 3 ~ 4.
- [9] 李振高. 土壤呼吸作用的测定. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 238 ~ 240.
- [12] 周建斌, 李生秀. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4 (3): 299 ~ 304.
- [15] 南京农业大学主编. *土壤农化分析*. 北京: 农业出版社, 1985.
- [16] 唐启义, 冯明光. *实用统计分析及其 DPS 数据处理系统*. 北京: 科学出版社, 2002.
- [22] 程积民, 万惠娥, 胡相明, 等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解. *生态学报*, 2006, 26 (4): 1207 ~ 1212.
- [23] 任京辰, 张平究, 潘根兴, 等. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义——以贵州贞丰—关岭岩溶石山地区为例. *地球科学进展*, 2006, 21 (5): 504 ~ 512.