

黄土丘陵区人工灌木林恢复过程中的土壤微生物生物量演变*

薛 蕙^{1,2} 刘国彬^{1*} 戴全厚^{1,3} 李小利¹ 吴瑞俊¹

(¹中国科学院/水利部西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西安理工大学, 西安 710048; ³贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要 采用时空互代法,以黄土丘陵区生态恢复过程中不同年限的人工柠条和沙棘林为研究对象,选取坡耕地和天然侧柏林为对照,分析了植被恢复过程中土壤微生物生物量、呼吸强度、代谢商(qCO_2)及土壤理化性质的演变特征。结果表明:生态恢复过程中人工柠条林土壤理化性质得到明显改善,微生物生物量随恢复年限的增加变化显著,柠条栽植7 a后微生物生物量碳较坡耕地显著增加,随后每5~7 a的变化均达到显著水平;微生物生物量氮和微生物生物量磷在前13 a无显著变化,20~30 a处于基本稳定期,较坡耕地显著增加,但明显低于天然侧柏林;呼吸强度随恢复年限的增加逐渐升高,20~25 a达到最大值,随后开始下降,30 a时达到最低值; qCO_2 在恢复初期较坡耕地显著升高,随后迅速降低,30 a后回落至坡耕地之下,但仍显著高于天然侧柏林;不同灌木林对土壤质量的改善作用不同,恢复年限相同的沙棘林土壤微生物生物量、呼吸强度明显高于柠条林,但 qCO_2 无显著差异。相关性分析显示,微生物生物量碳、氮、磷、 qCO_2 与土壤养分和恢复年限显著相关。黄土丘陵区人工灌木林可通过生物的自肥作用恢复土壤肥力和增加微生物生物量,但要恢复到破坏前该地区顶级群落时的土壤微生物生物量和理化指标,必须加强林地管理,促进植物群落的拓殖与更替,且此过程相对于生态破坏过程要漫长的多。

关键词 黄土丘陵区 人工灌木林 生态恢复过程 微生物量

文章编号 1001-9332(2008)03-0517-07 **中图分类号** S154 **文献标识码** A

Dynamic changes of soil microbial biomass in the restoration process of shrub plantations in loess hilly area XUE Sha^{1,2}, LIU Guobin¹, DAI Quanhou^{1,3}, LI Xiaoli¹, WU Ruijun¹ (¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources & Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; ³College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(3): 517-523

Abstract By the method of spatiotemporal substitution and taking a slope farmland and a natural *Platycladus orientalis* L. forest as the controls, this paper studied the dynamic changes of soil microbial biomass, microbial respiration, metabolic quotient (qCO_2) and physicochemical properties under the *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* plantations with different restoration age in loess hilly area. The results showed that with the increasing restoration age of the shrubs, soil physicochemical properties improved obviously and soil microbial biomass had a significant increase. After 7 years restoration of *C. korshinskii* plantation, soil microbial biomass C increased apparently compared with that in farmland, and the increments after each 5-7 years were all significant. Microbial biomass N and P had no significant increase in the first 13 years but kept relatively stable in the 20-30 years restoration of *C. korshinskii* plantation, and were significantly higher than those in farmland but lower than those under *P. orientalis* plantation after 30 years restoration of *C. korshinskii* plantation. Soil microbial respiration was enhanced with the increasing restoration age of the shrubs, with the peak in the 20-25 years restoration. After then, it decreased rapidly and

* 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407205)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2X2B205)和国家自然科学基金重点资助项目(90502007)。

** 通讯作者。E-mail: gbli@ms.iswc.ac.cn

2007202215 收稿, 2008201216 接受。

bottomed out in the 30 years restoration qCO_2 was significantly higher under *P. orientalis* plantation than in farmland in the early periods of shrubs restoration, and then decreased rapidly. After 30 years restoration of *C. korshinkii* plantation, qCO_2 was lower than that in farmland but still much higher than that under *P. orientalis* plantation. Different shrub plantations had different effects on soil properties. *H. rhamnoides* with the same restoration age of *C. korshinkii* contributed more to the increase of soil microbial biomass and respiration. There were significant correlations between the restoration age of test shrub plantations and the microbial biomass, qCO_2 , and physicochemical properties of soil. It was considered that vegetation restoration could be a feasible way in improving the environment and soil quality in less hilly area, but a longer period should be required to reach to the climax before vegetation destruction. It is necessary to strengthen and improve forest management to interfere and accelerate plant succession for a sustainable and healthy ecosystem.

Key words: less hilly area; shrub plantation; vegetation restoration; soil microbial biomass

土壤微生物是土壤中物质转化和养分循环的驱动力, 直接参与养分循环、有机质分解等诸多生态过程, 其指标通常被用来评价退化生态系统中生物群系与恢复功能之间的关系^[1]. 土壤微生物生物量是表征土壤生态系统中物质和能量流动的重要参数之一, 被认为是土壤活性养分的储存库, 是植物生长可利用养分的重要来源. 微生物生物量周转周期短, 能灵敏地反映环境因子、土地经营模式和生态功能的变化, 可作为评价土壤质量和反映微生物群落状态与功能的重要指标^[2-4]. 侵蚀环境指在水土流失区因侵蚀而造成的特有侵蚀景观和生态系统, 是一个包含自然侵蚀环境和人文侵蚀环境的复合型环境系统. 黄土丘陵区地形破碎, 土壤结构疏松, 自然植被遭到破坏, 是我国严重的水土流失区之一, 该区也是国家退耕还林还草及生态建设的重点区域. 恢复植被是该区水土保持与生态建设的重要措施, 植被的恢复除可以有效保持水土, 减少土壤侵蚀外, 还可以通过土壤-植物复合系统的功能来改善土壤质量.

人工林可通过次生演替恢复土壤性质和维持土壤肥力^[5-7], 从而达到重建动植物物种和恢复生态系统健康的目的, 土壤微生物在此恢复过程中具有至关重要的作用. 然而针对黄土丘陵区植被恢复演替过程中土壤微生物量变化的研究相对较少, 且大多集中于植被恢复后土壤理化性质方面的研究^[8-9]. 本文以黄土丘陵区主要人工造林树种柠条 (*Caragana korshinkii*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 为研究对象, 从土壤微生物学角度研究了侵蚀环境下人工灌木林促进生态恢复过程中土壤微生物学质量的演变, 为评价人工灌木林的生态恢复效果及土壤质量管理和山川秀美工程建设提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域 (36°46'42" N, 109°13'46" E, 109°16'03" E). 该地形破碎, 沟壑纵横, 属黄土高原丘陵沟壑地貌, 暖温带半干旱季风气候, 海拔 1 010~1 400 m, 年均气温 8.18 °C, 年均降水量 505.13 mm. 土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主, 抗冲抗蚀能力差, 植被类型属暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带. 纸坊沟流域是中国科学院安塞水土保持试验站生态恢复定位试验研究的小流域. 该流域生态系统先后经历严重破坏期 (1938-1958年)、继续破坏期 (1959-1973年)、不稳定期 (1974-1983年)、稳定恢复改善期 (1983-1990年) 和良性生态初步形成期 (1991年至今). 经过 30 多年的水土保持综合治理, 通过林草植被工程等措施建设有效遏制了该流域的土壤侵蚀, 成功地恢复了退化生态系统, 林地面积从 1980 年的不足 9% 增加到 40% 以上, 流域生态经济系统进入良性循环阶段^[10].

1.2 样地选择

应用时空互代法在流域内选择营造与管理方法一致、土壤与成土母质类型相同、栽植前均为坡耕地的以及坡向坡位相似的人工柠条林为研究对象, 这种方法虽然无法保证不同时、空的气候等外界环境的恒定, 但是却可以取得较长时间尺度的研究结果, 是生态学领域中普遍采用的研究方法. 所选样点分别为柠条林 7 a (CA7)、13 a (CA13)、20 a (CA20)、25 a (CA25)、30 a (CA30) 和沙棘林 15 a (HR15)、25 a (HR25), 同时为了研究植被恢复程度, 选取坡耕地 (sloping farmland, CK) 和天然次生侧柏林 (*Platycladus orientalis* L., PO) 为对照样地, 其基本特征见表 1.

表 1 样地基本特征

Tab 1 Description of the sampling plots

样地 Plot	恢复年限 Recovery years (a)	地貌 Landform	坡向 Slope direction	坡度 Slope degree (b)	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	林下草本类型 Undergrowth vegetation
CK	0	HS	N	22	1175	LS	谷子 <i>Setaria italica</i>
CA7	7	HS	S20°E	30	1142	LS	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
CA13	13	HS	W	21	1171	LS	长芒草 <i>S. bungeana</i>
CA20	20	HS	E45°S	27	1179	LS	茜草 茵陈蒿 <i>Rubia cordifolia</i> <i>Adiantum capillaris</i>
CA25	25	HS	N	24	1231	LS	铁干蒿 长芒草 <i>Artemisia sacrorum</i> <i>S. bungeana</i>
CA30	30	HS	N45°W	24	1029	LS	铁干蒿 长芒草 <i>A. sacrorum</i> <i>S. bungeana</i>
HR15	15	HS	E	23	1194	LS	枪草 <i>Melica scabrosa</i> Trin.
HR25	25	GS	N34°E	25	1133	LS	杂草 Weed
PO	-	HS	N15°W	33	1283	LS	披针苔 <i>Carex lancolet</i>

GS 沟坡 Gully slope HS 梁峁坡 Hillslope LS 黄绵土 Loessial soil

1.1.3 样品采集及分析

2005年7月下旬,在各试验样地按S型选取6点,用土钻法取0~20 cm混合土样,重复3次,带回实验室分2份分析。取1份土样过2 mm筛用于测定土壤微生物生物量和呼吸强度,采用氯仿熏蒸法熏蒸后用硫酸钾浸提,用全自动有机碳分析仪(TekmarDohmann Apollo 9000 TOC Combustion Analyzer)测定微生物生物量碳(microbial biomass C, C_{mic}),用全自动定氮仪(瑞典KJEL1026)测定微生物生物量氮(microbial biomass N, N_{mic}),用钼锑抗比色法测定微生物生物量磷(microbial biomass P, P_{mic})^[11-12],土壤呼吸强度采用碱液吸收法^[13]测定;另1份土样风干,过1 mm和0.125 mm筛后测定土壤基本理化性质^[14],有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定,全氮(TN)采用半微量凯氏法测定,采用pH计测pH值(水B±=21.5BI),土壤全磷(TP)采用碳酸钠熔融钼锑抗比色法测定(岛津2401紫外可见分光光度计,日本),速效磷采用Olsen法测定,速效钾采用乙酸铵提取2火焰光度法测定。代谢商(qCO_2)为呼吸强度与微生物

生物量的比值。

1.1.4 数据统计分析

数据为3个重复的平均值。采用SAS 6.12软件中的单因素方差分析(ANOVA)方法分析差异显著性,相关分析也采用SAS 6.12软件进行。

2 结果与分析

2.1.1 人工灌木林恢复过程中土壤微生物生物量变异特征

坡耕地退耕营造灌木林后,土壤微生物生物量表现出一定的变化规律(表2)。柠条栽植7 a后 C_{mic} 较坡耕地显著增加,并随着恢复年限的延长逐渐提高,每5~7 a的变化均达到显著水平; N_{mic} 和 P_{mic} 随植被恢复进程逐渐增加,但在前13 a并未达到显著水平,20~30 a处于基本稳定期,较坡耕地显著增加;恢复30 a后,土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 和 P_{mic} 较坡耕地分别增加了13%、11%和6%,但显著低于天然侧柏林,仅为侧柏林的38.12%、39.17%和56.16%。 C_{mic}/TOC 、 N_{mic}/TN 、 P_{mic}/TP 分别为31.83%~51.77%、

表 2 不同年限人工灌木林土壤微生物生物量、呼吸强度和代谢商值

Tab 2 Soil microbial biomass, respiration and qCO_2 of artificial shrubs with different revegetation years

样地 Plot	微生物生物量碳 C_{mic} ($mg \# kg^{-1}$)	微生物生物量氮 N_{mic} ($mg \# kg^{-1}$)	微生物生物量磷 P_{mic} ($mg \# kg^{-1}$)	微生物生物量碳/有机碳 C_{mic}/TOC ratio(%)	微生物生物量氮/全氮 N_{mic}/TN ratio(%)	微生物生物量磷/全磷 P_{mic}/TP ratio(%)	微生物生物量碳/氮 C_{mic}/N_{mic} ratio(%)	呼吸强度 Microbial respiration ($mg \# kg^{-1} \# d^{-1}$)	代谢商 Metabolic quotient ($mg \# CO_2 \# g^{-1} \# h^{-1}$)
CK	1291.42h	191.02c	61.73c	41.72c	51.21cd	11.23c	61.80	52.72e	161.97d
CA7	1811.82f	201.58c	61.53c	51.77a	51.72ab	11.36c	81.83	117.50c	261.48a
CA13	1941.17f	271.07c	71.55c	41.62c	51.05de	11.39c	71.17	103.58c	221.23c
CA20	2471.26e	391.03b	111.35b	31.83e	51.37c	11.93b	61.34	143.25b	241.14b
CA25	2821.60d	391.91b	111.05b	41.22d	41.70f	21.00b	71.08	143.11b	211.10c
CA30	3041.04c	411.29b	111.33b	51.30b	51.82a	11.97b	71.36	71.79d	91.84e
HR15	1561.95g	241.96c	71.23c	31.22g	41.58f	11.33c	61.29	96.00c	241.47b
HR25	3591.89b	461.80b	111.54b	31.55f	41.84ef	11.84b	71.69	191.14a	221.13c
PO	7931.91a	1031.89a	191.99a	31.82e	51.49bc	31.26a	71.64	102.60c	51.38f

同列不同字母表示样地间差异显著($P < 0.05$). Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level.下同 The same below.

4170% ~ 5182% 和 1123% ~ 2100%; 随着恢复年限的延长, C_{mic}/TOC 先降低, 恢复 20 a时达到最低值, 随后开始上升; P_{mic}/TP 与 P_{mic} 变化规律相同, 随恢复进程缓慢上升, 恢复 25 a时达到最大值; 而 N_{mic}/TN 无明显变化规律. 与柠条相似, 沙棘栽植后土壤微生物量随恢复年限的增加显著增大, 但沙棘的 C_{mic} 增加幅度明显高于柠条, C_{mic}/TOC 则远低于柠条.

212 人工灌木林恢复过程中土壤呼吸强度及 qCO_2 的变化

人工栽植柠条 7 a后土壤呼吸强度较坡耕地显著增大, 随着恢复年限的增加呼吸强度继续上升, 至 20~ 25 a时达到最大值, 随后开始下降, 30 a时达到最低值; qCO_2 在恢复初期显著高于坡耕地, 随着恢复进程迅速降低, 30 a后回落至坡耕地之下, 但仍显著高于天然侧柏林 (表 2). 相同恢复年限的沙棘林呼吸强度明显高于柠条林, 但 qCO_2 无显著差异.

213 人工灌木林恢复对土壤理化性质的影响

从表 3可以看出, 与坡耕地相比, 人工灌木林土壤理化性质随着植被恢复表现出一定的变化规律: 人工栽植柠条前 7 a土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效钾含量没有显著改变, 而后随着栽植年限的增加

这些含量逐渐升高, 25 a时达到高峰, 随后除速效钾外其余含量开始降低; pH和容重在恢复前 13 a的变化不明显, 随后随着恢复年限增加, 这些性质开始明显改善, 表现为 pH和容重逐渐降低; 速效磷和全磷随恢复年限的变化规律不明显; 营造人工沙棘林后, 土壤理化性质显著改善, 恢复年限越长其改善越显著. 生态恢复过程中人工柠条和沙棘林对土壤质量的改善作用不同, 恢复 25 a后柠条较坡耕地土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效钾含量的增幅分别为 144%、133%、151%和 47%, 容重降低了 10%; 而沙棘林对土壤质量的改善作用明显高于柠条林, 对有机碳、全氮、碱解氮和速效钾含量的增加幅度较柠条分别高出 123%、32%、88%和 40%, 容重则降低了 3%; 虽然人工植被恢复后土壤质量显著改善, 但恢复 25 a后的灌木林土壤有机碳、全氮和碱解氮含量仍显著低于侧柏林, 其中有机碳和全氮含量仅为侧柏林的 32116% ~ 48173%和 44183% ~ 51106%, 而 pH和容重为侧柏林的 114倍左右.

214 土壤微生物量、呼吸强度与恢复年限、养分的耦合作用

对微生物量、呼吸强度与土壤主要肥力因子、年限进行相关性分析 (表 4), 结果表明: C_{mic} 、

表 3 不同年限人工灌木林的土壤理化性状

Tab 3 Soil properties of artificial shrubs with different revegetation years

样地 Plot	有机碳 Organic C (g# kg ⁻¹)	全氮 Total N (g# kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg# kg ⁻¹)	全磷 Total P (g# kg ⁻¹)	速磷 Available P (g# kg ⁻¹)	C/N比 C/N ratio	速效钾 Available K (g# kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density (g# cm ⁻³)
CK	2174 g	01365 f	20190 f	01549 d	1164de	7151	10514 g	8173 ab	1117ab
CA7	3115 g	01360 f	18191 f	01481 e	1109 f	8175	10314 g	8177 a	1118 a
CA13	4120 f	01536 e	36150 e	01542 d	1133ef	7184	11612 f	8177 a	1115 b
CA20	6145 c	01727 d	52142 c	01588 c	2124 c	8187	16313 c	8165 d	1111 c
CA25	6169 c	01849 c	52142 c	01553 d	1182 d	7188	15512 d	8167 cd	1105 d
CA30	5174 d	01710 d	45112 d	01576 c	2132 c	8108	19213 b	8170 bc	1119 a
HR15	4187 e	01545 e	34151 e	01543 d	2136 c	8194	12818 e	8160 e	1108 c
HR25	10114 b	01967 b	71101 b	01627 a	4181 a	10149	19811 a	8157 e	1101 e
PO	20180 a	11894 a	10915 a	01613 b	3153 b	10198	19417 ab	8147 f	0172 f

表 4 土壤微生物量、呼吸强度和 qCO_2 值与养分因子的相关性分析

Tab 4 Correlations among microbial biomass, respiration, qCO_2 and soil nutrient properties

	微生物生物量碳 C_{mic}	微生物生物量氮 N_{mic}	微生物生物量磷 P_{mic}	呼吸强度 Respiration	代谢商 qCO_2	恢复年限 Years	有机碳 TOC	全氮 TN	碱解氮 Available N	全磷 TP	速效磷 Available P	速效钾 Available K
微生物生物量碳 C_{mic}	1	01994*	01966*	01156	- 01739	01993*	01984*	01983*	01947*	01608	01597	01705*
微生物生物量氮 N_{mic}		1	01984*	01156	- 01739	01963*	01987*	01992*	01963*	01647	01600	01725*
微生物生物量磷 P_{mic}			1	01203	- 01735	01916	01957*	01977*	01964*	01708	01611	01800*
呼吸强度 Respiration				1	01427	01416	01232	01232	01365	01370	01539	01409
代谢商 qCO_2					1	- 01392	- 01663	- 01687	- 01614	- 01496	- 01314	- 01563
恢复年限 Revegetation years						1	01898	01904	01869	01571	01707	01817

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 仅取柠条数据进行相关分析. Correlation analyses were based on the data of C. korshinskii

$N_{m,ks}$ 、 $P_{m,ks}$ 之间存在极显著相关,而且它们分别与有机碳、全氮、碱解氮和速效钾呈显著或极显著相关, $P_{m,ks}$ 还与全磷显著相关; qCO_2 与 $C_{m,ks}$ 、 $N_{m,ks}$ 、 $P_{m,ks}$ 和全氮呈显著负相关;而呼吸强度和其它因子的相关性较小,未达到统计学上的显著水平.坡耕地退耕造林后 $C_{m,ks}$ 、 $N_{m,ks}$ 、 $P_{m,ks}$ 、有机碳、全氮、碱解氮、速效钾与恢复年限呈显著或极显著相关.

3 讨 论

土壤微生物生物量对土壤环境的各种变化极为敏感,能充分反映土地利用方式和生态功能的变化,可作为生态学指标来反映人类活动的干扰和指示微生物群落的大小^[15]. Wardle等^[16]研究表明在植被演替的中间阶段土壤微生物生物量达到最大值,并与树的最大基面积在时间上一致. Jia等^[17]认为,土壤微生物生物量随恢复年限而增加,在17 a时达到最高值,而后下降,最后保持在一个比较稳定的水平.本研究结果表明,坡耕地退耕营造灌木林后,随着年限延长,微生物生物量增加显著,并在中龄期趋于稳定.据此推测,侵蚀环境下的坡耕地由于耕作、施肥等人为措施,经营强度大,表土侵蚀严重,有机物质矿化剧烈,导致微生物生物量含量降低^[18-20];而坡耕地营造灌木林后,原来开放或半开放的农田生态系统物质循环结构转变为人工生态系统的封闭或半封闭物质循环结构,每年大量的枯枝落叶和营养元素等物质重新返回到生态系统中,且随着植被恢复演替的进行,有机物质输入逐渐增多,微生物可利用的碳源、氮源增加,微生物活性及微生物生物量升高.

Vance等^[21]研究认为,在无外部因素干扰的情况下,土壤微生物生物量并不能完全反映微生物的活性、结构和功能,因此除分析其绝对量外,还应考虑微生物生物量碳、氮、磷在全碳、全氮和全磷中的比例,从微生物学角度揭示植被恢复过程中土壤生物学质量的变异. Zeller等^[22]研究报告,土壤微生物生物量碳、氮、磷占有机碳、全氮和全磷的比例分别为0.127%~7.10%、2%~6%和0.19%~8.13%,本研究结果与其相似,但微生物生物量碳和氮的比例相对偏高,而微生物生物量磷的比例偏低.黄土丘陵区土壤有机碳和氮素贫瘠,微生物代谢功能期短,要维持植物生长所需要的碳源、氮源和营养物质,就必须提高微生物生物量在有机碳和全氮中的比例来维持高的物质代谢能力.土壤微生物商(qMB)指微生物细胞固定的有机碳占土壤有机碳的比例,受土壤

有机质的数量和质量影响^[23],反映微生物生物量碳和土壤有机碳的相互作用^[24],可用来监测土壤有机质变化、灵敏地指示土壤微生物生物量^[25].植被恢复初期有机物归还量增大,惰性有机质开始积累, qMB 降低;恢复20 a后土壤干层开始形成,归还量降低,为了满足植被所需要的营养物质,必须提高 qMB 来维持高的有机物代谢和物质循环.

在生态恢复过程中,植被的变化通过吸收养分和归还有机物等影响土壤理化和生物学性质,土壤微生物呼吸随之变化,指示着系统恢复中土壤质量的演变过程. Anderson等^[26]认为呼吸反映了整个微生物群落的活性,包括休眠和未休眠状态的微生物群体.一般认为,土壤中的微生物大部分处于休眠状态,只有一小部分对呼吸有贡献. Sparling^[27]则认为呼吸代表了活性微生物生物量碳部分.本研究也发现土壤呼吸强度与微生物生物量碳和有机碳的变化过程不同步,说明作为呼吸基质的有机碳的数量和质量对呼吸强度有重要的控制作用,而呼吸强度是否可以用于代表微生物群落全部活性及其相互作用机理还有待于进一步研究.

qCO_2 把微生物生物量的大小和微生物整体活性有机结合,代表了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率,是反映环境因素、管理措施等对微生物活性影响的一个敏感性指标^[28-29]. Odum^[30]认为环境胁迫条件下,微生物必须从维持生长和繁殖的能量中分流出一部分去补偿由于胁迫所需要付出的额外能量.本研究结果表明,侵蚀环境下人为干扰对坡耕地影响显著,土壤肥力严重衰退,其保水保肥能力极差,此种环境下微生物要维持正常的生命活动必然要付出额外的维持能,因此 qCO_2 高;植被恢复初期,虽然人为干扰减少,土壤肥力得到一定程度的恢复,但植被处于快速增长期,对养分需求量大,所以微生物必须加快对养分的固定来满足植被需要,从而导致微生物体周转速率加快, qCO_2 升高;随着恢复年限的增加,微生物受到的胁迫减少, qCO_2 降低,低的 qCO_2 可以保证高的代谢效率,使土壤有充足的活性有机物,维持较好的土壤性状和可持续利用潜力. Andrews等^[31]认为在没有新鲜易分解有机质输入的土壤中以 k 对策微生物群落为主,它们有着更复杂的食物网, qCO_2 较低.据此可以推测,人工生态恢复后随着恢复年限的增加植被物种增多,为微生物代谢提供可利用的物质逐渐丰富,微生物群落的食物网趋于复杂,生态系统更趋于稳定.

农业耕作活动可以造成土壤碳和氮的损失,而

植被恢复可以通过根系分泌物和残体增加土壤碳源和氮源,影响土壤物质循环,改善土壤性质^[32]。坡耕地退耕后,土壤的营养元素、水分及植物残体等物质重新返回到生态系统中,为退耕后的养分补给和改善提供了充足的物质来源,特别是微生物生物量和活性的增大增强,加速了土壤的物质代谢能力,促进了土壤的养分积累,使土壤性质不断得到改善,改善后的土壤又能为植被恢复提供更多的营养物质,促进植被恢复,二者相互促进,互为动力。另一方面,随着植被的恢复,地表覆盖度增大,从而可有效防止或减轻水蚀和风蚀的形成,减少土壤养分的流失。随着植被的恢复,物种逐渐丰富,植被生物量增大,代谢途径多样化,对土壤性质的改善显著增强,生态系统向健康方向发展。

相关性分析表明,土壤质量的改善与恢复年限显著相关,说明在黄土丘陵区依靠生物的自肥作用来恢复土壤质量是可能的,如措施得当,在该区恢复健康持久性的天然植被、实现秀美山川是完全可行的。但也应看到土壤营养元素在恢复30a时出现下降趋势,这可能是由于土壤干化导致植物生长减慢、群落衰退,因此必须通过加强林地管理及合理疏林来减少土壤水分胁迫;同时还应引入演替后续物种,促进植物群落的拓殖与更替。研究还发现,与天然次生侧柏林相比,恢复后的土壤质量仍显著低于该区域顶级群落时的水平。

综上所述,侵蚀环境下的黄土丘陵区由于不合理的土地利用导致土壤质量降低,特别是代表生物学特性的微生物生物量显著降低,而营造人工灌木林后,可以在一定程度上依靠植物的自肥能力提高土壤质量属性,但相对于林地开垦后土壤肥力的退化^[33-34],此改善过程要漫长得多。因此必须从植被建设角度对林分管理方式及后续物种引入进行深入研究,以加速生态恢复进程,实现该区域生态系统的持久健康发展。

参考文献

- [1] Harris JA. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4): 801-808
- [2] Powlson DS, Brookes PC, Christensen BT. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2): 159-164
- [3] Anderson TH, Domsch KH. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess

the effects of environmental conditions such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(3): 393-395

- [4] Rogers BF, Tate III RL. Temporal analysis of the soil microbial community along a top sequence in Pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10): 1389-1401
- [5] Campbell BM, Frost P, King JA, et al. The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi-arid types at Matopos, Zimbabwe. *Agroforestry Systems*, 1994, 28(2): 159-172
- [6] Lamb D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: The potential role of timber plantations. *Restoration Ecology*, 1998, 6(3): 271-279
- [7] An S2S (安韶山), Huang Y2M (黄懿梅). Study on the ameliorate benefits of *Caragana korshinskii* shrub2 wood to soil properties in besshilly area. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2006, 42(1): 70-74 (in Chinese).
- [8] Gong J (巩杰), Chen L2D (陈利顶), Fu B2J (傅伯杰), et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, 15(12): 2292-2296 (in Chinese)
- [9] Wen Z2M (温仲明), Jiao F (焦峰), Liu B2Y (刘保元), et al. Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in foreststeppe zone on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, 16(11): 2025-2029 (in Chinese)
- [10] Liu GB. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: Challenge and prospective. *A Journal of the Human Environment*, 1999, 28(8): 663-668
- [11] Howarth WR, Paul EA. Microbial biomass// Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS, eds. *Methods of Soil Analysis Part 2 - Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: American Society of Agronomy, 1994
- [12] He Z2L (何振立). Method for measuring soil microbial biomass. *Present and future Progress in Soil Science (土壤学进展)*, 1994, 22(4): 36-44 (in Chinese)
- [13] Xu GH (许光辉), Zheng H2Y (郑洪元). *Analytical Handbook of Soil Microbes*. Beijing: China Agricultural Press, 1986 (in Chinese)
- [14] Lu R2K (鲁如坤). *Analytical Methods for Soil and Agrochemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [15] Wardle DA. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 1992, 67: 321-358
- [16] Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, 305: 509-513
- [17] Jia GM, Cao J, Wang CY, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwuling, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117-125

- [18] Wang Y (王 岩), Shen Q2R (沈其荣), Shi RH (史瑞和), et al. Soil microbial biomass and its ecological effects. *Journal of Nanjing Agricultural University (南京农业大学学报)*, 1996, 19(4): 45- 51 (in Chinese)
- [19] Yang W2D (杨武德), Wang ZQ (王兆骞), Su iG2P (睦国平), et al. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 1999, 10(2): 175- 178 (in Chinese)
- [20] Zhang C2E (张成娥), Liang Y2L (梁银丽), He X2B (贺秀斌). Effects of plastic cover cultivation on soil microbial biomass. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2002, 22(4): 508- 512 (in Chinese)
- [21] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703- 707
- [22] Zeller V, Bardgett RD, Tappeiner U. Site and management effects on soil microbial properties of subalpine meadows. A study of land abandonment along a north-south gradient in the European Alps. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 639- 649
- [23] Srivastava SC, Singh SF. Microbial C and P in dry tropical forest soils. Effects of alternate land uses and nutrient flux. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(2): 117- 124
- [24] Insan H, Domsch KH. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of the reclamation sites. *Microbial Ecology*, 1988, 15(2): 177- 188
- [25] Garcia C, Hernandez T, Roldan A, et al. Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 635- 642
- [26] Anderson TH, Domsch KH. Maintenance carbon requirements of active heterotrophic microbial populations under in situ conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(2): 197- 203
- [27] Sparling GP. Microcalorimetry and other methods to assess biomass and activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13(2): 93- 98
- [28] Brookes PC, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen. A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837- 842
- [29] Brookes PC. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 269- 279
- [30] Odum EP. Trends expected in stressed ecosystems. *BioScience*, 1985, 35(7): 419- 422
- [31] Andrews H, Harris F. Selection and microbial ecology. *Advances in Microbial Ecology*, 1986, 9: 99- 147
- [32] Rutigliano FA, Ascoli RD, De Santo AV. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1719- 1729
- [33] Huang S2Y (黄少燕), Zha X (查 轩). Study on soil erosion process and evolution of soil physicochemistry characteristics on sloping farmland. *Journal of Mountain Research (山地学报)*, 2002, 20(3): 290- 295 (in Chinese)
- [34] Shi Y2X (史衍玺), Tang K2L (唐克丽). Soil nutrient degradation under influence of forest land accelerated erosion. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation (土壤侵蚀与水土保持学报)*, 1996, 2(4): 26- 33 (in Chinese)

作者简介 薛 蕙,男,1978年生,博士后.主要从事微生物生态与恢复生态学研究. E-mail: xuesha100@163.com

责任编辑 张雪妹
