

黄土高原沟壑区不同植被恢复模式 对土壤生物学特性的影响

张笑培^{1a,2}, 杨改河^{1b,2}, 王得祥^{1c}, 冯永忠^{1b,2}, 任广鑫^{1b,2}

(1 西北农林科技大学 a. 资源环境学院, b. 农学院, c. 林学院, 陕西 杨凌; 2 陕西省循环农业工程技术中心, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】了解不同植被恢复模式对土壤生物学特性的影响,为科学评价退耕还林的生态效应提供依据。【方法】以黄土高原沟壑区陕西千阳县冉家沟流域为研究对象,选择农地(小麦地)为对照,分析侧柏天然次生林、不同林龄(5,20,30年)刺槐人工林、桃树林、荆条灌丛和苜蓿草地等不同植被恢复模式下,土壤理化性质、微生物量及酶活性的特征。【结果】在不同的植被恢复模式下,土壤理化性质均较农地得到改善;微生物量碳、氮、磷基本较农地显著增加,增幅分别为254.78%~35.72%,112.67%~6.8%和115.03%~5.3%;过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性均比农地增强,增幅分别为95.84%~18.94%,119.51%~20.36%,229%~20%和250%~73%。土壤生物学特性的改变进一步促进了土壤性状的改善。相关分析结果显示,微生物量碳及氮、土壤酶活性与土壤有机质、全氮多呈极显著正相关。【结论】不同植被恢复模式对土壤微生物量和酶活性的影响不同,但均较农地有很大改善和提高,其中尤以刺槐林的生态效应最为明显。

【关键词】 黄土高原; 沟壑区; 植被恢复; 土壤生物学特性; 微生物量; 酶活性

【中图分类号】 S154 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2008)05-0149-06

Effect of different vegetation restoration models on soil microbial characters in the gully region of Loess Plateau

ZHANG Xiao-pe^{1a,2}, YANG Gai-he^{1b,2}, WANG De-xiang^{1c},
FENG Yong-zhong^{1b,2}, REN Guang-xin^{1b,2}

(1a College of Resources and Environment, b College of Agronomy, c College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study was to find the effect of different vegetation restoration models on soil microbial characters and to provide scientific basis for assessing the ecological effects of “Grain for Green”. 【Method】 Soil physiochemical properties, microbial biomass enzyme activities in the soil under *Platycladus orientalis*, *Vitex negundo*, *Robinia pseudoacacia*, *Medicago sativa* L were studied, compared with the wheat land in Ranjiagou Catchment at the Qianyang county of Shaanxi province in China. 【Result】 Soil physiochemical properties, microbial biomass enzyme activities increased apparently compared with the farmland. After different vegetation recoveries, soil microbial biomass C, N, P (SMBC, SMBN, SMBP) respectively increased by 254.78%—35.72%, 112.67%—6.8% and 115.03%—5.3% as compared with the farmland. Soil enzyme activities also increased. The activity of soil Catalase, Alkaline phosphatase, Ureases

* [收稿日期] 2007-11-02
[基金项目] 国家重大基础预研项目(2005CCA05300);西北农林科技大学“青年学术骨干人才”专项
[作者简介] 张笑培(1978—),女,河北藁城人,博士,主要从事资源与环境生态研究。E-mail: xiaopeihb@163.com
[通讯作者] 杨改河(1957—),男,陕西耀县人,教授,博士生导师,主要从事资源与环境生态研究。E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

and invertase all increased along with the vegetation rehabilitation ages by 95.84%—18.94%, 119.51%—20.36%, 229%—20% and 250%—73% as compared with the farmland. The change of soil microbial characters bettered the soil physiochemical properties. Soil microbial biomass C, N, enzyme activities were positively related to soil organic carbon, total nitrogen, suggesting that soil microbial biomass, enzyme were closely correlated with soil fertility and plant restoration could indirectly influence soil microbial characters. 【Conclusion】 Different vegetation restorations had different effects on soil microbial biomass and enzyme activities, they were critical for the improvement of soil physiochemical properties and microbial properties, the eco-effect of *Robinia pseudoacacia* was the best.

Key words: the Loess Plateau; gully region; vegetation recovery; soil microbial character; microbial biomass; enzyme activity

黄土高原是我国水土流失严重的地区之一,也是国家退耕还林还草生态工程建设的重点区域。随着该工程的实施,大规模的退耕还林还草工作在黄土高原陆续展开。目前,退耕还林的生态效应已成为人们关注的热点。植被恢复能有效保持水土、减少土壤侵蚀,通过植被与土壤双重生态系统的交互作用,可改善土壤生物学特性,提高土壤质量。土壤微生物直接参与土壤养分循环及有机质分解等诸多生态过程,是生态系统物质和能量循环的驱动力^[1-2],对外界的胁迫比动植物反映敏感^[3],不同土地利用方式会对土壤微生物群落的结构和功能产生显著影响^[4]。土壤微生物量反映微生物群落的状态和功能,可作为反映人类活动影响的生态学指标^[5-6]。土壤酶在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用^[7],反映土壤生产力、微生物活性的潜力^[8]和土壤营养循环过程的速率,能够预报土壤利用和生物的变化^[9-10]。土壤微生物量、酶活性被认为是土壤生物学特性的重要指标,反映植被恢复中土壤质量改善的效果^[11-14],而目前关于退耕还林还草工程对土壤生物学特性影响的研究相对较少。本试验以退耕还林还草为背景,对黄土高原沟壑区小流域内不同退耕模式下,土壤的理化性质、微生物量及酶活性进行了系统研究,旨在揭示相同立地条件下,不同退耕还林还草模式对土壤微生物特性的影响,为科学评价退耕还林的生态效应提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于渭北黄土高原沟壑区西部的陕西千阳县冉家沟(34°37'N, 107°04'E),海拔 710~1 546 m。年均气温 10.8℃,≥10℃活动积温 3 478℃,年均日照 2 093 h,多年平均无霜期 197 d,多年平均降水量 653 mm,降水大多集中在 7~9 月,占全年降

水量的 54%。多年平均蒸发量为 1 203 mm,相当于年自然降水量的 1.84 倍。该流域为典型的黄土高原丘陵沟壑地貌,沟壑纵横,主沟道长 5.5 km,沟壑密度 0.7 km/km²,沟道比降 11.2%。流域中上游属土石山地,中下游为黄土覆盖。主要植被有天然生侧柏(*Platycladus orientalis*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)及人工种植的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、苜蓿(*Medicago sativa* L)等,农作物有玉米(*Zea mays* L)和小麦(*Triticum*)。

1.2 测定内容与方法

1.2.1 样地选择 为将造成土壤生物学特性空间异质性的因子最小化,样地均选择在同一沟道的阳坡上,坡度相近(10°~25°)。选择的植被恢复模式有侧柏(*P. orientalis*)天然次生林,荆条(*V. negundo*)灌丛,30, 20 和 5 年生刺槐(*R. pseudoacacia*)林,桃树(*Prunus persica*)林和苜蓿(*M. sativa*)草地,以小麦地为对照。样地基本特征见表 1。

1.2.2 测定项目及方法 2007-05 下旬,样地按 S 形多点取样,取样深度 0~10 cm,土样混匀作为分析样品。采集土样一份装入聚乙烯塑料袋,并迅速带回实验室于 4℃保存,供土壤微生物量及酶活性测定;另一份带回室内风干,用于土壤理化性质测定。

土壤理化性质按常规方法测定^[15],其中有机质(TOC)含量用重铬酸钾氧化外加加热法,全氮(TN)用凯氏定氮法,全磷(TP)用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法,土壤速效氮用 KCl 浸提流动注射分析仪测定,速效磷用 Olsen 法,速效钾用乙酸铵提取-火焰光度法,pH 值用 pH 计测定,容重、孔隙度用环刀法测定。

土壤微生物量用氯仿熏蒸法测定^[16]。熏蒸后用硫酸钾浸提,用全自动有机碳分析仪测定微生物量碳(Cmic),用全自动定氮仪测定微生物量氮

(Nmic),然后用钼锑抗比色法测定微生物量磷(Pmic)。

脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性分别用苯酚钠比色法、高锰酸钾滴定法、滴定法、对硝基苯磷酸钠法测定^[17-19]。其中,脲酶活性以 37 ℃下培养 24 h 后 1 g 土释放的 NH₃-N 质量(mg)表示;

过氧化氢酶活性以 1 g 土消耗 0.02 mol/L 高锰酸钾的体积(mL)表示;蔗糖酶活性以 37 ℃下培养 24 h 后 1 g 土消耗 0.05 mol/L Na₂S₂O₃ 的体积(mL)表示;碱性磷酸酶活性以 37 ℃下培养 1 h 后 1 g 土壤释放的对硝基酚的质量(μg)表示^[17-19]。

表 1 样地的基本特征
Table 1 Description of sampling plots

植被类型 Vegetation	编号 Number	退耕年限/a Age	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	乔灌木高度/m Tree height	郁闭度 Coverage
刺槐 Robinia pseudoacacia	RP30	30	1 152	28	15.7	0.85
刺槐 R. pseudoacacia	RP20	20	1 005	15	8.7	0.75
刺槐 R. pseudoacacia	CRP5	5	995	15	5.6	0.60
桃树 Prunus persica	T	8	931	12	2.8	0.70
苜蓿 M. sativa L	MS	5	960	15	—	—
荆条 V. negundo	VN	—	946	25	1.3	0.80
侧柏 P. orientalis	PO	—	944	25	5.5	0.90
小麦 Triticum	CK	0	922	10	—	—

1.3 数据统计分析

方差分析(ANOVA)及相关分析(CORR)用 SAS6.12 统计软件进行分析^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响

不同植被通过根系分泌物和残体增加了土壤的

C 源和 N 源,对土壤的物质循环产生影响,从而改善了土壤的质量^[21]。表 2 表明,不同植被恢复模式下,土壤的理化性质基本较对照农地提高,且不同植被类型间差异明显,其中有机质、全氮含量分别提高 71.63%~9.76%和 62.32%~2.90%;而全磷和速效养分变化规律性不太明显;随退耕时间的延长,pH 值和容重逐渐变小。

表 2 不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响

Table 2 Effect of different vegetation recoveries on soil physiochemical properties

植被类型 Vegetation	TOC/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)	速效氮/ (mg · kg ⁻¹) Available N	速效磷/ (mg · kg ⁻¹) Available P	速效钾/ (mg · kg ⁻¹) Available K	pH	容重/ (g · cm ⁻³) bulk density
30 年刺槐 R. pseudoacacia	21.11 a	1.12 a	0.61 a	18.25 b	8.12 a	110.32 e	7.90 c	1.15 e
20 年刺槐 R. pseudoacacia	17.8 b	0.91 b	0.51 cd	18.12 c	3.21 e	135.63 b	8.03 b	1.21 d
5 年刺槐 R. pseudoacacia	14.8 cd	0.82 c	0.38 f	16.35 d	2.68 g	114.12 c	8.15 a	1.41 a
桃树 P. persica	13.6 d	0.71 d	0.52 bc	13.12 e	5.16 d	149.13 a	7.89 c	1.29 b
苜蓿 M. sativa L	13.5 d	0.81 c	0.42 e	22.89 a	1.52 h	65.23 f	8.02 b	1.40 a
荆条 V. negundo	21.1 a	0.89 b	0.51 cd	3.92 h	7.12 c	139.12 b	7.70 d	1.21 d
侧柏 P. orientalis	18.1 b	0.93 b	0.49 d	7.28 g	2.81 f	105.12 e	8.01 b	1.13 e
小麦 Triticum	12.3 e	0.69 d	0.54 b	11.02 f	7.36 b	68.32 f	8.15 a	1.25 c

注:同列数据后标不同字母者表示在 1%水平上的差异显著性。下表同。

Note:The different letters at the same column indicate significant difference at 1% level. The same below.

2.2 不同植被恢复模式对土壤微生物量的影响

生物学中将生活在土壤中体积小于 5×10³ mm 具有生命活性特征的有机物质总量统称为土壤微生物量,其影响土壤物质循环和能量流动,能够指示土壤微生物群落的大小,可以作为生态学指标反映人类活动对生态系统干扰的程度^[22]。

表 3 表明,不同植被恢复模式下,土壤微生物量基本较农地(小麦)显著增加,微生物量碳、氮、磷的

增幅分别为 254.78%~35.72%,112.67%~6.8%和 115.03%~5.3%。刺槐林地微生物量增幅较其他植被恢复模式高,且增幅为 20 年刺槐>30 年刺槐>5 年刺槐;侧柏林地微生物量也较农地增加,但增幅低于 30 年刺槐林;桃树林地微生物量低于 5 年刺槐林;苜蓿地受苜蓿固氮、根系及落叶的共同作用,土壤 C 源、N 源增加,微生物量较农地提高。土壤微生物是土壤中有生命的成分,对土壤中环境的

各种变化极为敏感,能反映土壤生态环境的变化。黄土高原沟壑区农地由于耕作、施肥等人为措施的影响,经营强度大,有机质矿化加剧,导致微生物量降低。退耕后植被得到恢复,有机物质输入增加,提供了微生物需要的 C 源、N 源,因而微生物量增多,

由于不同植被恢复模式输入的有机物质不同,造成不同植被恢复模式下土壤微生物种类和数量的差异,导致植被恢复重建过程中土壤生物学特性存在一定差异。

表 3 不同植被恢复模式对土壤微生物量的影响

Table 3 Microbial biomasses of soil in different vegetation recoveries

植被类型 Vegetation	Cmic/ (mg · kg ⁻¹)	Nmic/ (mg · kg ⁻¹)	Pmic/ (mg · kg ⁻¹)	Cmic/TOC /%	Nmic/TN /%	Pmic/TP /%	Cmic/Nmic /%
30 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	579.0 a	49.68 a	13.59 a	2.74 b	4.87 ab	2.23 b	11.65 a
20 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	582.3 a	50.02 a	13.71 a	3.27 a	5.50 a	2.69 a	11.64 a
5 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	302.1 d	34.85 c	8.12 b	2.04 c	4.25 b	2.14 b	8.67 dc
桃树 <i>P. persica</i>	256.3 e	23.52 d	6.03 c	1.88 c	3.31 c	1.16 e	10.90 ab
苜蓿 <i>M. sativa</i> L	221.5 f	27.52 fd	7.31 bc	1.64 d	3.40 c	1.74 c	8.05 d
荆条 <i>V. negundo</i>	341.2 c	36.98 bc	5.98 c	1.62 d	4.16 bc	1.17 e	9.23 c
侧柏 <i>P. orientalis</i>	361.2 b	42.31 b	6.98 bc	2.00 c	4.55 ab	1.42 d	8.54 cd
小麦 <i>Triticum</i>	163.2 g	23.36 d	6.32 c	1.33 e	3.39 c	1.17 e	6.99 e

2.3 不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响

土壤酶是由活体或死亡的土壤微生物和植物根系产生的,对土壤物质转化和能量转化过程起主要作用。通过土壤酶对进入土壤的多种有机物质的转化,可使生态系统的各组分在功能上产生联系,最终保持土壤生物化学性质的相对稳定性^[18]。表 4 表明,不同植被恢复模式下,土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性都显著高于农地(小麦),增幅分别为 95.84%~18.94%,119.51%~20.36%,229%~20%和 250%~73%;30 年刺槐林土壤酶活

性最高,其次为 20 年刺槐,二者均大于 5 年刺槐;桃树、侧柏、荆条林地的酶活性低于 30 年刺槐,这与桃园、侧柏、荆条林地内群落结构单一、土壤微生物量少有较大关系;苜蓿地中各种酶活性高于农地,与 5 年刺槐林地相比,除脲酶活性略高、过氧化氢酶活性相当外,其他 2 种酶活性均较低。由以上分析可知,不同植被恢复模式中,乔木林土壤酶活性高于灌木和人工草地;作为主要生态恢复树种,刺槐林生态效果较明显,且随着林龄的增加酶活性也越来越强。

表 4 不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响

Table 4 Soil enzyme activities of different profiles during vegetation restoration

植被类型 Vegetation	过氧化氢酶/(mL · g ⁻¹) Catalase	碱性磷酸酶/(μg · g ⁻¹) Alkaline phosphatase	脲酶/(mg · g ⁻¹) Urease	蔗糖酶/(mL · g ⁻¹) Invertase
30 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	10.73 a	283.16 a	5.53 a	6.16 a
20 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	10.13 a	246.46 b	4.32 b	4.62 b
5 年刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	7.32 d	175.88 c	2.07 d	3.99 c
桃树 <i>P. persica</i>	9.22 b	180.93 c	2.03 d	3.45 c
苜蓿 <i>M. sativa</i> L	7.32 d	141.93 f	2.33 d	3.06 d
荆条 <i>V. negundo</i>	6.52 e	156.85 e	4.04 c	4.86 b
侧柏 <i>P. orientalis</i>	8.54 c	173.13 c	3.95 c	4.69 b
小麦 <i>Triticum</i>	5.48 f	113.92 g	1.68 e	1.76 e

2.4 不同植被恢复模式下土壤生物学指标间的相关分析

不同植被恢复模式下土壤微生物量、酶活性及理化性质间的相关性分析结果见表 5。由表 5 可知,在植被恢复过程中,土壤微生物量与酶活性呈正相关关系,其中土壤微生物量碳与过氧化氢酶呈显著相关,与其他 3 种酶呈极显著相关;微生物量氮与碱性磷酸酶呈显著相关,与脲酶和蔗糖酶呈极显著相关;微生物量磷与过氧化氢酶呈显著相关,与碱性

磷酸酶呈极显著相关。以上分析表明,在植被恢复过程中,微生物与酶活性的改善程度比较一致,土壤微生物代谢活动对土壤酶活性有显著影响,并且土壤微生物和酶对土壤肥力的演变反应也较敏感,因此在黄土高原沟壑区不同植被恢复过程中显示了较好的相关性。

从不同酶活性之间的相关性分析(表 5)可以看出,4 种水解酶之间相关性较好,说明土壤中呼吸代谢、多糖转化、有机磷转化与氮素转化之间的关系密

切且相互影响。土壤理化性质、土壤微生物量和酶活性间的相关性分析结果表明,土壤微生物量和酶活性与土壤有机质、全氮、全磷的相关性较好,与速效养分和容重的相关性较差(表 5)。

表 5 不同植被恢复模式下土壤微生物量与土壤理化性质的相关分析

Table 5 Correlation analysis between soil microbial properties and soil physiochemical properties under the restoration chronosequences

	N _{mic}	P _{mic}	过氧化 氢酶 Catalase	碱性磷 酸酶 Alkaline phosphatase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	TOC	TN	TP	速效磷 Available P	速效氮 Available N	速效钾 Available K	pH	容重 Bulk density
C _{mic}	0.949 **	0.901 **	0.818 *	0.941 **	0.891 **	0.848 **	0.756 *	0.844 **	0.441	−0.203	0.195	0.453	−0.250	−0.560
N _{mic}	1	0.813 *	0.674	0.823 *	0.908 **	0.861 **	0.810 *	0.892 **	0.309	−0.262	0.072	0.329	−0.181	−0.592
P _{mic}		1	0.761 *	0.897 **	0.695	0.605	0.464	0.711 *	0.376	0.092	0.531	0.162	0.074	−0.323
过氧化氢酶 Catalase			1	0.920 **	0.655	0.700	0.444	0.642	0.405	0.070	0.384	0.477	−0.192	−0.401
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase				1	0.789 *	0.816 *	0.625	0.796 *	0.469	0.037	0.348	0.460	−0.212	−0.438
脲酶 Urease					1	0.908 **	0.929 **	0.942 **	0.563	−0.283	−0.062	0.334	−0.496	−0.743 *
蔗糖酶 Invertase						1	0.914 **	0.921 **	0.337	−0.149	−0.046	0.521	−0.527	−0.538
TOC							1	0.864 **	0.446	−0.403	−0.312	0.460	−0.663	−0.678
TN								1	0.408	−0.003	0.106	0.173	−0.341	−0.572
TP									1	−0.305	−0.211	0.184	−0.405	−0.786 *
速效磷 Available P										1	−0.401	−0.504	0.364	0.634
速效氮 Available N											1	−0.309	0.430	0.499
速效钾 Available K												1	−0.576	−0.269
pH													1	0.394
容重 Bulk density														1

注: * 和 * * 分别表示相关系数达到统计显著($P=0.05$)和极显著($P=0.01$)。
Note: Correlation coefficients labeled by * and * indicate significant difference at $P=0.05$ and $P=0.01$ respectively.

3 讨 论

植被恢复重建是黄土高原生态环境建设的重要内容,对土壤生物学特性的改善具有重要作用。刺槐是黄土高原退耕还林工程中的重要生态建设树种,在 0~20 年生长阶段,随着林龄的增加,土壤微生物量逐渐增加,酶活性逐渐增强;30 年刺槐林地的生物学特性比 20 年刺槐林地略有降低,可能是因为随着生长年代的增加,土壤表层的枯枝落叶增厚,对土壤中好氧微生物产生了一定的影响;也可能是由于刺槐林达到成熟林期土壤水分消耗过大,刺槐生长机能降低,群落结构趋于单一化所致。侧柏天然次生林地微生物量比农地增加,但低于 30 年刺槐林地,可能是因为侧柏林地为多石山地,草本灌木较少,群落结构单一,土壤微生物数量较少,而刺槐林地群落结构丰富,尤其是 20 和 30 年刺槐林,已形成以刺槐为主,乔、灌、草相结合的群落结构,且刺槐可形成固氮菌和菌根,增大了对氮的固定,所以刺槐林地的土壤微生物量较高。桃树林龄 8 年虽长于 5 年生刺槐林,但因人为因素的干扰,如对园地进行除草等农作措施致使桃园的群落结构单一,几乎无其他

草本、灌木,微生物量低于相同立地条件下的刺槐林。

本研究结果表明,不同植被恢复模式下,土壤微生物量碳、氮、磷与有机质、全氮、全磷的比值分别为 1.33%~3.27%,3.31%~5.50%,1.16%~2.69%,这与前人研究报道的结果相似^[23]。与薛莲等^[24]对黄土高原丘陵区土壤微生物量的研究结果相比,本研究微生物量碳与有机质的比值相对较小,可能与该流域有机质含量、降水量较丘陵区高,采样时间是雨季前期有关。Saggar 等^[25]和 Sparling^[26]研究认为,随着农业耕作及土壤的开发利用,土壤微生物量碳与有机质含量均减少(有机质减少 60%,微生物量碳减少 83%),土壤微生物量碳库下降速率比土壤有机质快,故微生物量碳与有机质比值也随之降低。

本研究表明,对照农地微生物量碳与有机质比值低于其他植被类型,可能是由于对农地的耕作,使土壤微生物量碳库下降且缺乏有机质的补给所致。微生物量碳氮比可以反映土壤微生物种类和区系组成^[27],细菌、放线菌、真菌的碳氮比一般在 5:1,6:1 和 10:1 左右^[28]。本研究中不同植被恢复模式

下,土壤微生物量碳氮比较对照农地高,说明在植被恢复过程中,土壤中真菌的增长率要高于细菌。

4 结 论

通过退耕还林还草工程恢复植被后,土壤的理化性质比对照农地显著改善,有机质、全氮逐渐增加,pH 值和容重逐渐降低,土壤微生物量和酶活性比农地显著提高。桃园、苜蓿地土壤生物学特性值低于 20 年刺槐林地。侧柏天然林、荆条各指标值大多低于 30 年刺槐林地,表明人工刺槐林在该区域更有利于土壤生物学特性的改善。综合以上分析可知,植被恢复有利于土壤生物学特性的改善,尤以刺槐林的生态效应最为明显。

[参考文献]

[1] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration [J]. *Eur J Soil Sci*,2003, 54:801-808.

[2] Schinel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle [J]. *Global Change Biol*,1995,1:77-91.

[3] Panikov N S. Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change [J]. *Applied Soil Ecology*,1999,11:161-176.

[4] Bionio D A,Scow K M. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils [J]. *Appl Environ Microbiol*,1995,61:4043-4050.

[5] Rogers B F,Tate R L Ⅲ. Temporal analysis of the soil microbial community along a topo sequence in pineland soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2001,33:1389-1401.

[6] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. *Biological Rev*,1992,67:321-358.

[7] Bending G D,Turner M K,Jones J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2002,34:1073-1082.

[8] Margarita S,Fernando G P,Lillian F. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* plantations in Uruguay [J]. *Applied Soil Ecology*,2004(3):1-9.

[9] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health [M]//Pankhurst C E,Doube B M,Gupta V V S R. Biological indicators of soil health[M]. Oxon, United Kingdom: CAB International,1997:121-156.

[10] Gary D B,Mary K T,Francis R,et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2004,36:1785-1792.

[11] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass a global synthesis [J]. *Soil Biochem*,1998, 30 (13):1627-1637.

[12] Kandeler E,Tscherko D,Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass N mineralization and enzyme activities of a chemozem under different tillage management [J]. *Biol Fertil Soils*,1999,28:343-351.

[13] 杨玉盛,何宗明,邱仁辉,等. 严重退化生态系统不同恢复与重建措施的植物多样性与地力差异研究 [J]. *生态学报*,1999, 19(4):490-494.

Yang Y S,He Z M,Qiu R H,et al. Effects of different recover and restoration measures on plant diversity and soil fertility for serious degradation ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999,19(4):490-494. (in Chinese)

[14] 胡 斌,段昌群,王震洪,等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响 [J]. *土壤学报*,2002,39(4):604-608.

Hu B,Duan C Q,Wang Z H,et al. Effect of vegetation rehabilitation measures on fertility and soil enzymatic activity in degraded ecosystem [J]. *Acta Pedologica Sinica*,2002,39(4): 604-608. (in Chinese)

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.

Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press,1999. (in Chinese)

[16] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006.

Wu J S,Lin Q M,Huang Q Y,et al. Soil microbial biomass-methods and application[M]. Beijing: Weather Press,2006. (in Chinese)

[17] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法 [M]. 北京:科学出版社,1985.

The Nanjing Soil Graduate School of Chinese Academy of Sciences. Methods of soil microorganism [M]. Beijing: Sciences Press,1985. (in Chinese)

[18] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京:科学出版社,1987.

Zhou L K. Soil enzymology [M]. Beijing:Science Press,1987. (in Chinese)

[19] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京:农业出版社,1986.

Xu G H,Zheng H Y. Manual on analysis methods of soil microbiology [M]. Beijing: Agriculture Press,1986. (in Chinese)

[20] 胡小平,王长发. SAS 基础及统计实例教程 [M]. 陕西:西安地图出版社,2001.

Hu X P,Wang C F. Basis of SAS and statistic examples [M]. Xi'an:Xi'an Map Publishing House,2001. (in Chinese)