

晋西黄土丘陵区不同退耕年限刺槐林土壤养分效应

于博威^{1,3}, 刘高焕¹, 刘庆生¹, 冯九梁², 王小平², 韩国忠², 赵忠贺^{1,3}, 杨军²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 山西省水土保持科学研究所, 太原 030013; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以典型黄土丘陵沟壑区不同退耕年限刺槐林为研究对象, 采用实地调查、土壤室内分析和数理统计相结合的方法, 研究了黄土丘陵区人工刺槐林等高种植的土壤养分生态效应。结果表明: 随植树年限的增加, 植树坑外与坑内土壤全钾、总有机碳、活性有机碳含量呈先增加后减少的变化趋势, pH先升高后降低, 而土壤阳离子交换量呈先减少后增加的变化特征; 随土层深度的增加, 除土壤pH外, 土壤养分呈减少趋势; 坑内平均土壤全钾、总有机碳和活性有机碳含量分别比坑外增加了1.99%、4.94%和3.93%, 说明人工刺槐林等高种植有利于改善黄土丘陵区的土壤养分。

关键词: 土壤养分; 等高大坑; 黄土丘陵区; 刺槐

中图分类号: S714.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)04-0188-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.04.032

Effects of Soil Nutrient in *Robinia pseudoacacia* Forests with Various Ages in the Loess Hilly Region of Western Shanxi Province

YU Bowei^{1,3}, LIU Gaohuan¹, LIU Qingsheng¹, FENG Jiuliang²,
WANG Xiaoping², HAN Guozhong², ZHAO Zhonghe^{1,3}, YANG Jun²

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. Institute of Soil and Water Conservation of Shanxi Province, Taiyuan 030013; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: *Robinia pseudoacacia* plantations with various ages in the loess hilly region of western Shanxi were studied to investigate the ecological effects of soil nutrient inside and outside the contour pit by using the method of field survey, indoor analysis and statistics. The results showed that the contents of soil total potassium (TK), total organic carbon (TOC), labile organic carbon (LOC) and soil pH inside and outside the pit increased at first, and then decreased with the increasing forest age, while soil cation exchange capacity (CEC) had the opposite change trend. Except soil pH, soil nutrient decreased with the increase of soil depth. Compared to outside the pit, average TK, TOC and LOC inside the pit increased by 1.99%, 4.94% and 3.93%, respectively, suggesting that the contour cropping of *Robinia pseudoacacia* plantation was more conducive to improving the soil nutrient.

Key words: soil nutrient; contour pit; loess hilly region; *Robinia pseudoacacia*

土壤养分是土地生产力的重要基础, 是植被生长的必要条件, 也是衡量土壤质量的主要指标^[1]。然而, 在黄土高原地区, 由于其特殊而深厚的黄土母质和严重的水土流失等原因, 土壤持水性能差, 土壤养分含量低, 已成为当地植被恢复与建设的主要限制因子之一^[2]。而在土壤—植被系统中, 土壤为植被生长提供水分和矿质营养, 同时, 植被对土壤养分产生生态效应, 二者相辅相成^[3]。因此, 开展植被恢复过程对土壤养分的影响及生态效应研究具有重要意义, 为退化生态系统的重建提供科学依据。

黄土丘陵区是我国水土流失最为严重、生态环境极其脆弱的地区, 加之长期以来滥垦、滥牧、滥伐等人为活动干扰, 导致土壤中有有机质、氮、磷、钾等养分严重流失, 土壤生产力下降。为了保护黄土高原地区的自然生态环境, 维持土壤可持续生产力, 自从20世纪50年代以来, 国家已经在该区开展了一系列水土保持和生态重建工程。深入了解植被建设工程的土壤养分效应能够为区域人工植被生态系统土地生产力的保育和区域生态安全的可持续管理提供理论依据。等高大坑整地植被恢复是治理坡地水土流失重

收稿日期: 2016-01-27

资助项目: 中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室自主研究项目

第一作者: 于博威(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事区域生态评价研究。E-mail: yubw.15b@igsrr.ac.cn

通信作者: 刘高焕(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域生态评估与环境变化模拟研究。E-mail: liugh@lreis.ac.cn

要的工程和生物措施之一,与其他水保工程措施配套,不仅具有防止坡地土壤侵蚀、保护表土的作用,而且具有汇集、保持雨水并增加入渗的功能。特别是在黄土丘陵区,水分条件差,植树造林较难成活,等高大坑不仅为植被建设和树木生长营造良好的水分条件,而且产生明显的土壤养分效应^[4]。然而,尽管在过去的十几年间,许多学者在黄土高原地区不同尺度上开展了大量关于土壤养分的研究,但这些研究主要集中在土壤养分空间变异^[5-10]、不同土地利用类型土壤养分特征^[11]、不同退耕年限土壤养分效应^[12]以及土壤养分在坡地流失规律与流失形态^[13-14]等方面,并且研究尺度以坡面为主^[15],而缺乏对典型黄土丘陵沟壑区不同退耕年限刺槐林等高大坑内外土壤养分生态效应的对比研究。基于此,本研究以不同退耕年限人工刺槐林为研究对象,通过坑外与坑内土壤养分的比较,以期揭示不同退耕年限刺槐林土壤养分的变化特征,对黄土丘陵区生态建设及人工林生态系统可持续发展具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区小流域位于山西省吕梁山脉西麓的石楼县(北纬 36°55′—36°58′,东经 110°45′—110°48′),地处黄河中游水土流失十分严重的多砂粗砂区,小流域总面积 9.77 km²,地貌类型属于典型黄土丘陵沟壑区,平均海拔 1 130.5 m,相对高差 291 m,沟谷密度 2.32 km/km²。年均气温 9.2 °C,年均降水量 485 mm,多集中于 7,8,9 月,占全年降水的 60%以上,属于暖温带大陆性季风气候。土壤属黄土灰质褐性土,母质为黄土。自然植被多见刺儿菜(*Cirsium setosum*)、黄花蒿

(*Artemisia annua*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等,常见人工植被有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、旱柳(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等,主要农作物有玉米、谷子、小麦等。

近十年来,香港力行植林慈善基金会为改善该研究区生态环境,已在该区连续种植 130 多公顷人工生态林,其中造林树种以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主,山杏(*Armeniaca sibirica*)、国槐(*Sophora japonica*)、火炬树(*Rhus typhina*)等为辅。主要采取的植林工程模式是:采用等高大坑整地(长 2 m,宽 50 cm,深 50 cm)、“品”字形排列,坑中心距 3 m,行距 1.5 m,每 666.7 m² 约有 150 个坑。整地时先将表层杂草清除干净,将表层熟土层翻到坑的上边,生土层下翻打垆,然后将稻壳(每坑 3 kg)和表层熟土混合回填入坑内,填土深 40 cm,经雨季降水踏实后栽植。栽苗完成后用松树皮覆盖,坑内覆盖厚度 2~3 cm^[16]。植树成活率平均在 70%以上,远高于当地造林成活率,林木发育良好,有助于改善土壤条件和涵养水源。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 于 2015 年 5—6 月在研究区选取分别退耕 4,5,6,7 a 生刺槐林作为研究样地,不同退耕年限刺槐林各选取有代表性的重复样地 3 个(表 1)。在每个样地选取有代表性的样点,分别于等高大坑内外挖掘土壤剖面,采样深度 0—50 cm,分为 0—10,10—20,40—50 cm 3 个土层进行土壤样品采集,土壤样品自然风干,分别处理通过 0.25 mm 和 1.00 mm 筛孔以供测定。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/ m	树龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均林分密度/ (株·hm ⁻²)	林冠叶面积 指数
R ₄	1187~1202	4	2.70	2.45	1420	0.58
R ₅	1152~1199	5	6.65	4.11	1550	2.32
R ₆	1078~1084	6	5.13	8.76	1764	1.66
R ₇	1064~1072	7	8.35	9.15	1983	1.37

注:R₄ 为退耕 4 a 刺槐林;R₅ 为退耕 5 a 刺槐林;R₆ 为退耕 6 a 刺槐林;R₇ 为退耕 7 a 刺槐林。

1.2.2 室内分析 土壤养分指标包括土壤全氮(Total N, TN)、全磷(Total P, TP)、全钾(Total K, TK)、阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)、总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)、活性有机碳(Labile Organic Carbon, LOC)和 pH。土壤全氮含量采用半微量开氏法测定;全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼蓝比色法测定;全钾含量采用氢氧化钠熔融—火焰分光光度法测定;阳离子交换量采用滴定法测定;总有机碳含量采用重铬酸钾氧化—分光光度法测定;活性有机碳含量采用高锰酸钾氧化法测定;pH 采用电极法测定。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 进行数据预处理,用 R 3.2.1 统计软件对不同退耕年限刺槐林各土壤养分指标进行 ANOVA 分析,运用 LSD 法检验不同退耕年限刺槐林同一土层以及同一退耕年限不同土层间土壤养分的差异显著性($\alpha=0.05$)。运用双变量相关分析中的 Pearson 相关系数分别分析坑外与坑内的土壤养分指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限刺槐林坑外土壤养分变化特征

由表 2 可知,不同退耕年限刺槐林土壤全氮和全磷含量在 40—50 cm 土层均呈显著差异,即退耕 4 a

刺槐林土壤全氮含量显著高于退耕 6 a 刺槐林,并且退耕 6 a 刺槐林土壤全磷含量显著低于其他退耕年限刺槐林。随退耕年限的增加,土壤全氮含量在 0—10 cm 土层逐渐增加,在 10—20,40—50 cm 土层先减少后增加;土壤全磷含量在 0—10,40—50 cm 土层随退耕年限增加呈先减少后增加的变化趋势,而在 10—20 cm 土层呈先增加后减少的趋势。从不同土层差异来看,相同退耕年限刺槐林在不同土层土壤全氮和全磷含量均无显著差异。但总体上,随土层深度增加,土壤全氮和全磷含量呈减少趋势。

退耕 4 a 刺槐林土壤全钾含量在 10—20 cm 土层显著低于退耕 5,6 a 刺槐林,在其他土层无显著差异。但在各土层随退耕年限增加,土壤全钾含量呈先

增加后减少的变化趋势;与之相反,土壤阳离子交换量随退耕年限呈先减少后增加的变化趋势,并且退耕 5 a 刺槐林土壤阳离子交换量在各土层均低于退耕 4 a 刺槐林。土壤全钾和阳离子交换量在不同土层之间均无显著差异,总体上均随土层深度而减少。

不同退耕年限刺槐林土壤总有机碳在同一土层均无显著差异,而退耕 5 a 刺槐林土壤活性有机碳含量在 10—20 cm 土层显著高于退耕 4,7 a 刺槐林,二者在各土层均随退耕年限呈先增加后减少的变化趋势;土层之间差异明显,随土层深度而减少。

土壤 pH 值在各土层随退耕年限增加均呈先升高后降低的趋势,并达到显著差异水平。随土层深度而升高,土层之间无显著差异。

表 2 不同退耕年限刺槐林坑外土壤养分变化

土壤养分	土层深度/cm	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	1.57±0.44Aa	1.56±0.13Aa	1.62±0.62Aa	1.73±0.17Aa
	10—20	1.59±0.12Aa	1.48±0.11Aa	1.40±0.16Aa	1.57±0.22Aa
	40—50	1.63±0.44Aa	1.44±0.13ABa	1.06±0.01Ba	1.53±0.11ABa
全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	0.60±0.03Aa	0.58±0.04Aa	0.58±0.11Aa	0.62±0.02Aa
	10—20	0.59±0.03Aa	0.64±0.01Aa	0.60±0.12Aa	0.60±0.01Aa
	40—50	0.58±0.02Aa	0.57±0.05Aa	0.50±0.02Ba	0.59±0.01Aa
全钾含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	12.67±1.62Aa	15.10±0.62Aa	15.35±1.20Aa	13.40±2.25Aa
	10—20	11.33±1.55Ba	14.70±1.35Aa	14.35±1.34Aa	13.40±0.72ABa
	40—50	12.53±1.10Aa	14.07±1.23Aa	14.65±1.91Aa	11.97±1.55Aa
阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	0—10	7.44±0.49Aa	5.14±1.29Ba	6.58±1.80ABa	6.49±1.14ABa
	10—20	7.26±0.39Aa	5.03±1.40Ba	5.03±0.21Ba	6.36±1.12ABa
	40—50	7.43±0.53Aa	4.92±1.42Ba	4.05±1.32Ba	6.12±0.80ABa
总有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	7.94±0.53Aa	9.19±0.94Aa	9.69±7.93Aa	7.70±3.10Aa
	10—20	5.68±0.46Ab	6.85±1.53Ab	6.43±2.83Aa	6.18±2.59Aa
	40—50	3.25±1.43Ac	4.14±0.41Ac	3.43±1.58Aa	3.85±2.01Aa
活性有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	0.93±0.09Aa	1.14±0.17Aa	1.34±0.26Aa	1.11±0.50Aa
	10—20	0.51±0.26Bab	1.09±0.17Aa	0.66±0.26ABa	0.48±0.09Bb
	40—50	0.22±0.27Ab	0.58±0.21Ab	0.58±0.13Aa	0.26±0.04Ab
pH	0—10	8.39±0.03Ba	8.53±0.02ABa	8.69±0.07Aa	8.43±0.16Ba
	10—20	8.38±0.10Ba	8.53±0.03Ba	8.76±0.00Aa	8.49±0.14Ba
	40—50	8.39±0.03Ba	8.55±0.06Ba	8.87±0.01Aa	8.50±0.15Ba

注:同行不同大写字母表示同一土层在不同退耕年限刺槐林间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一退耕年限刺槐林在不同土层间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同退耕年限刺槐林坑内土壤养分变化特征

由表 3 可知,不同退耕年限刺槐林土壤全氮在 0—10 cm 土层呈显著差异,即退耕 4 a 刺槐林土壤全氮含量显著高于退耕 6 a 刺槐林;但在各土层不同退耕年限刺槐林土壤全磷含量均无显著差异。随退耕年限的增加,土壤全氮含量在各土层先减少后增加;土壤全磷含量在 10—20,40—50 cm 土层随退耕年限增加呈先减少后增加的变化趋势,而在 0—10 cm 土层无明显变化趋势。从不同土层之间变异来看,除退耕 7 a 刺槐林土壤全磷含量在 0—10 cm 土层显著高于 40—50 cm 土层外,相同退耕年限刺槐林在不同土层土壤全氮和全磷含量均无显著差异。但总体上,随土层深度增加,土壤全氮含量呈增加趋势,土壤全磷含量无明显变化趋势。

在 0—10 cm 土层不同退耕年限刺槐林土壤全钾

含量无显著差异,而在其他土层呈显著差异;而不同退耕年限刺槐林土壤阳离子交换量只在 40—50 cm 土层差异达到显著。随退耕年限增加,土壤全钾含量先增加后减少;与之相反,土壤阳离子交换量先减少后增加。二者在不同土层之间均无显著差异,但均随土层深度增加而减少。

不同退耕年限刺槐林土壤总有机碳在同一土层均无显著差异;而土壤活性有机碳含量在 10—20,40—50 cm 土层差异显著。二者均随退耕年限增加呈先增加后减少的趋势;相同退耕年限刺槐林不同土层之间存在明显差异,且均随土层深度增加而递减。

土壤 pH 值在各土层随退耕年限增加均呈先升高后降低的趋势,并达到显著差异水平。随土层深度增加而升高,各土层之间无显著差异。

表 3 不同退耕年限刺槐林坑内土壤养分变化

土壤养分	土层深度/cm	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	1.72±0.20Aa	1.61±0.20ABa	1.32±0.07Ba	1.51±0.07ABa
	10—20	1.49±0.10Aa	1.54±0.14Aa	1.36±0.02Aa	1.55±0.22Aa
	40—50	1.53±0.20Aa	1.64±0.08Aa	1.35±0.24Aa	1.57±0.12Aa
全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	0.59±0.03Aa	0.58±0.05Aa	0.64±0.07Aa	0.63±0.01Aa
	10—20	0.59±0.04Aa	0.52±0.08Aa	0.58±0.05Aa	0.60±0.02Aab
	40—50	0.59±0.01Aa	0.59±0.06Aa	0.54±0.01Aa	0.58±0.01Ab
全钾含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	13.90±1.47Aa	14.03±0.59Aa	16.25±2.90Aa	13.73±2.73Aa
	10—20	13.40±1.99ABa	14.13±0.15Aa	15.70±1.13Aa	11.63±1.00Ba
	40—50	12.27±1.26Ba	14.03±1.22ABa	15.20±0.14Aa	12.50±1.25Ba
阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	0—10	6.94±0.82Aa	5.00±1.45Aa	5.05±0.09Aa	6.41±1.22Aa
	10—20	7.08±0.97Aa	4.89±1.47Aa	5.05±0.55Aa	6.29±1.22Aa
	40—50	7.01±0.98Aa	4.78±1.42Ba	4.40±0.52Ba	6.31±1.23ABa
总有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	7.84±0.67Aa	9.51±1.58Aa	9.64±4.89Aa	8.27±3.03Aa
	10—20	5.83±0.48Ab	7.80±1.96Aa	6.72±2.24Aa	6.85±3.22Aa
	40—50	3.06±0.98Ac	4.19±0.88Ab	4.21±1.18Aa	4.08±1.91Aa
活性有机碳含量/ (g·kg ⁻¹)	0—10	0.99±0.17Aa	1.40±0.34Aa	1.14±0.07Aa	1.15±0.50Aa
	10—20	0.51±0.22Bb	1.15±0.23Aa	0.70±0.13Ba	0.49±0.06Bb
	40—50	0.20±0.24Bb	0.59±0.12Ab	0.69±0.14Aa	0.24±0.06Bb
pH	0—10	8.35±0.03Ca	8.47±0.04Ba	8.62±0.10Aa	8.45±0.05BCa
	10—20	8.38±0.04Ba	8.50±0.09Ba	8.68±0.09Aa	8.40±0.03Ba
	40—50	8.42±0.06Ba	8.54±0.10ABa	8.71±0.08Aa	8.43±0.12Ba

2.3 不同退耕年限刺槐林坑外与坑内土壤养分比较

由表 4 可知,刺槐林等高线种植大坑尽管可以汇集保持雨水,但不同退耕年限刺槐林对坑内外土壤养分的改善作用在各土层均无显著差异。由表 2 和表 3 可知,坑内外不同退耕年限刺槐林平均土壤全氮和全磷含量无明显差异,坑内平均土壤全钾、总有机碳和活性有机碳含量分别比坑外增加了 1.99%,4.94%和 3.93%,坑外平均阳离子交换量和 pH 值分别比坑内增加了 3.81%和 0.55%。随退耕年限增加,坑外与坑内土壤全钾、总有机碳、活性有机碳含量呈先增加后减少的变化趋势,pH 先升高后降低,而土壤阳离子交换量呈先减少后增加的变化特征。此外,坑内外土壤全氮、全磷随退耕年限变化有所差异,在坑外,土壤全氮含量随退耕年限先减少后增加,全磷无变化趋势;在坑内,土壤全氮含量随退耕年限无变化趋势,全磷先减少后增加。随土层深度增加,坑外与坑内土壤全钾、阳离子交换量、总有机碳和活性有机碳含量总体上呈减少的变化特征,pH 呈升高的趋势。坑内外土壤全氮与全磷随土层变化有所差异,在坑内,二者随土层深度先减少后增加;在坑外,土壤全氮呈减少趋势,全磷先增加后减少。

2.4 不同退耕年限刺槐林土壤养分指标间的关系

不同退耕年限刺槐林坑外与坑内土壤养分指标 Pearson 相关分析结果(表 5,表 6)可以看出,坑外与坑内土壤全钾含量与土壤总有机碳、活性有机碳和 pH 值均呈显著正相关,而土壤 pH 值与土壤全氮、阳离子交换量均呈显著负相关。此外,坑外土壤全氮与

土壤全磷、阳离子交换量和总有机碳含量均呈显著正相关,土壤全磷与土壤 pH 值呈显著负相关,而坑内土壤全磷与其他养分指标均无显著相关性。

表 4 不同退耕年限刺槐林坑外与坑内土壤养分比较

土壤养分	土层深度/cm	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
全氮	0—10	a~a	a~a	a~a	a~b
	10—20	a~a	a~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~a
全磷	0—10	a~a	a~a	a~a	a~a
	10—20	a~a	a~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~a
全钾	0—10	a~a	a~a	a~a	a~a
	10—20	a~a	a~a	b~a	a~b
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~a
阳离子交换量	0—10	a~a	a~a	a~a	a~a
	10—20	a~a	a~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~a
总有机碳	0—10	a~a	a~a	a~a	b~a
	10—20	a~a	b~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~a
活性有机碳	0—10	a~a	a~a	a~a	a~a
	10—20	a~a	a~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	b~a	a~a
pH	0—10	a~a	a~a	a~a	a~a
	10—20	a~a	a~a	a~a	a~a
	40—50	a~a	a~a	a~a	a~b

注:“~”两边小写字母表示坑外与坑内间差异显著性;a~a 表示坑内外无显著差异;a~b 表示坑外显著高于坑内;b~a 表示坑外显著低于坑内(P<0.05)。

表 5 坑外土壤养分指标间的相关系数

土壤养分	TN	TP	TK	CEC	TOC	LOC	pH
TN	1						
TP	0.454**	1					
TK	-0.186	0.107	1				
CEC	0.488**	0.305	-0.287	1			
TOC	0.462**	0.500**	0.435*	0.172	1		
LOC	0.307	0.297	0.490**	-0.020	0.727**	1	
pH	-0.497**	-0.345*	0.531**	-0.563**	0.057	0.12	1

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。下同。

表 6 坑内土壤养分指标间的相关系数

土壤养分	TN	TP	TK	CEC	TOC	LOC	pH
TN	1						
TP	0.228	1					
TK	-0.207	-0.076	1				
CEC	0.148	0.083	-0.258	1			
TOC	-0.200	-0.010	0.483**	-0.040	1		
LOC	0.055	-0.009	0.481**	-0.219	0.737**	1	
pH	-0.432*	-0.122	0.637**	-0.422*	0.052	0.109	1

3 讨论与结论

不同退耕年限刺槐林等高大坑内外土壤全氮含量具有一定程度的表层富集现象,0—10 cm 土层土壤改良效果较明显,主要由于退耕还林后地表枯落物增多,加上刺槐林属于豆科植物可自身固氮,从而有利于改善土壤表层全氮状况^[17]。土壤全磷在坑内外随土层变化不明显,因全磷在枯落物层中的含量很低,对土壤全磷含量的影响较小,土壤全磷含量主要取决于矿质土层^[18]。坑外土壤全钾含量不同退耕年限刺槐林平均值在各土层均低于坑内相应土层,这是由于林下坑内总有机物积累较多,并且全钾含量与总有机碳具有很好的相关性^[19](表 5,表 6)。与土壤全钾相反,坑外土壤阳离子交换量不同退耕年限刺槐林平均值在各土层均高于坑内相应土层,主要是土壤阳离子交换量取决于土壤矿物种类,其大小与土壤胶体种类及含量有关。该区不同退耕年限刺槐林土壤总有机碳和活性有机碳含量均具有明显的表层富集现象,这与前人的研究一致^[3,11],这是因为植被覆盖的林地,植物残体与枯枝落叶物多积累在土壤表层所致^[20]。坑外土壤 pH 值不同退耕年限刺槐林平均值在各土层均高于坑内相应土层,这是因为坑内土壤表层聚集了较多的枯枝落叶,枯枝落叶在分解过程中向表层土壤释放有机酸,从而降低了土壤 pH 值^[21]。

随退耕年限的增加,坑内外土壤全钾、总有机碳、活性有机碳含量和 pH 值在各土层呈先增加后减少的变化趋势,这是由于整地时将稻壳和表层土混合后与深层土发生互换,加上刺槐幼龄林枯枝落叶等凋落物量有限。此外,坑外土壤总有机碳含量与全氮、全钾、活性有机碳呈显著正相关,坑内土壤全钾与总有机碳、活性有机碳和 pH 值呈显著正相关,全磷与其他养分指标均无显

著相关性,主要受土壤母质和成土作用等影响,该小流域土壤均发育于黄土性母质的灰褐色土壤,成土作用基本相同,加上全磷的迁移率很低,所以全磷含量在整个小流域的空间分布比较均匀,受植被影响较小^[19]。

综上所述,相对于林地开垦后的土壤条件退化,建设植被改造土壤生长条件是一个较漫长的过程^[3]。有研究表明,退耕 11 a 后,人工林地比单靠自然恢复的撂荒地土壤养分含量相对更高一些,人工林地土壤出现酸化倾向^[22]。刺槐的生长年限一般为 50 a,但由于在黄土丘陵区土壤干层的形成,林分在生长后期会迅速衰败,从土壤养分恢复的角度对人工林的管理与后续林种的选择需要深入研究。另外,由于本研究时间、空间尺度相对较小,结果的外推和应用也需要进一步检验和研究。

参考文献:

- [1] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测:以陕西省横山县为例[J].土壤学报,2008,45(4):577-584.
- [2] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [3] 许明祥,刘国彬.黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J].植物营养与肥料学报,2004,10(1):40-46.
- [4] 王月玲,王思成,蔡进军,等.半干旱黄土丘陵区坡地集流水平沟的设计与应用[J].水土保持通报,2012,32(4):147-150.
- [5] 肖波,王庆海,尧水红,等.黄土高原东北缘退耕坡地土壤养分和容重空间变异特征研究[J].水土保持学报,2009,23(3):92-96.
- [6] 高义民,同延安,胡正义,等.黄土区村级农田土壤养分空间变异特征研究[J].土壤通报,2006,37(1):1-6.
- [7] 杜峰,梁宗锁,徐学选,等.陕北黄土丘陵区撂荒群落土

- 壤养分与地上生物量空间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(1):13-22.
- [8] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2009, 150(1):141-149.
- [9] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3):294-299.
- [10] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析: 以横山县为例[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):105-108.
- [11] 信忠保, 余新晓, 张满良, 等. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3):379-384.
- [12] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):979-986.
- [13] 王珂, 沈掌泉, John S B, 等. 精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2):33-36.
- [14] Corstanjea R, Grunwald S, Reddyb K R, et al. Assessment of the spatial distribution of soil properties in a northern everglades marsh[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(3):938-949.
- [15] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2):603-612.
- [16] 杨军. 香港力行植林慈善基金会石楼植林造水小记[J]. 山西水土保持科技, 2015(2):39-40.
- [17] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(3):527-537.
- [18] 李瑞雪, 薛泉宏, 杨淑英, 等. 黄土高原沙棘、刺槐人工林对土壤的培肥效应及其模型[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1):14-21.
- [19] 栗妍, 魏玮, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域植被恢复驱动下的土壤养分特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6):115-121, 128.
- [20] 蒋勇军, 袁道先, 章程, 等. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响: 以云南小江流域为例[J]. 地理学报, 2005, 60(5):751-760.
- [21] 崔国发, 蔡体久, 杨文化. 兴安落叶松人工林土壤酸度的研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(3):33-36.
- [22] 谢静, 郑学良, 朱清科, 等. 黄土区人工林与自然封育对土壤养分的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):35-39, 46.

(上接第 187 页)

- [8] 崔凤娟, 李立军, 刘景辉, 等. 免耕留茬覆盖对土壤呼吸和土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21):147-153.
- [9] 李月梅. 保护性耕作对土壤养分及部分物理性状的影响[J]. 农机化研究, 2011(11):148-152.
- [10] 曹良元, 张磊, 蒋先军, 等. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中集中氮素形态分布的影响[J]. 植物营养与肥料, 2009, 15(4):48-52.
- [11] 刘威, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 两种保护性耕作对土壤养分、结构和产量的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):420-427.
- [12] 张凤云. 黑河流域灌区保护性耕作农田土壤微生物生物量碳、氮的动态变化[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(5):631-635.
- [13] Powlson D S, Jenkinson D S. A comparison of the organic matter, biomass, adnosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1981, 97:713-721.
- [14] 郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 免耕对旱作燕麦田耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3):575-582.
- [15] 张丽华, 黄高宝, 张仁陟. 旱作条件下免耕对土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 甘肃农业科技, 2006(12):3-6.
- [16] Franchini J C, Crispino C C, Souza R A, et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1/2):18-29.
- [17] 毕冬梅, 张仁陟, 汪娟, 等. 不同耕作措施对麦—豆轮作条件下土壤有机碳库与微生物商的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6):11-16, 22.
- [18] 王芸. 保护性耕作对麦田土壤微生物特性及理化性状的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.