

乔灌木治理年限对红壤区土壤养分的影响

毛兰花^{1,3}, 查轩^{1,2,3}, 黄少燕^{1,2}, 刘根华^{1,3}, 白永会^{1,3}, 张婧^{1,3}, 姚冲^{1,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 3. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007)

摘要: 以退化红壤区4个不同治理年限的乔灌木混交治理措施的马尾松林地和未被治理的严重侵蚀退化马尾松林地为研究对象, 研究不同治理年限的乔灌木治理措施对土壤养分特征的影响。研究表明: (1) 土壤有机质、全N、全P含量变化范围分别为0.81~28.10 g/kg, 0.18~1.15 g/kg, 0.03~0.18 g/kg, 均随治理年限的增加呈上升趋势, 增速规律为先快后慢; 土壤全K含量变化范围为0.92~4.65 g/kg, 治理13年后全K含量最高在40—60 cm土层, 增速规律为先慢后快。 (2) 土壤养分与治理年限相关性分析显示, 土壤有机质含量、全N含量与治理年限存在显著相关关系($P < 0.05$), 土壤全P含量与治理年限存在极显著相关关系($P < 0.01$), 土壤全K含量与治理年限没有相关性。研究认为, 乔灌木混交治理措施下的马尾松林地土壤养分含量与治理年限具有相关性, 可为生态治理与恢复提供科学依据。

关键词: 治理年限; 马尾松林地; 土壤养分; 南方红壤区

中图分类号: S157.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0173-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.025

Effects of Management Years of Trees, Shrubs and Grasses on Soil Nutrients in Red Soil Region

MAO Lanhua^{1,3}, ZHA Xuan^{1,2,3}, HUANG Shaoyan^{1,2},

LIU Genhua^{1,3}, BAI Yonghui^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3}, YAO Chong^{1,3}

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. State Key Laboratory of

Subtropical Mountain Ecology Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fuzhou 350007)

Abstract: In degraded red soil area, taking the *Pinus massoniana* forest mixed by shrub and grass measures with 4 different management years as the object of study, and the unmanaged severely degraded pine as control, the effects of management years on soil nutrients were studied. The results showed that: (1) The range of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus contents were 0.81~28.10 g/kg, 0.18~1.15 g/kg and 0.03~0.18 g/kg, respectively, and all contents increased with the increase of management duration, and first fast and then slow in increasing rates. Total potassium contents ranged in 0.92~4.65 g/kg, with the highest in the 40—60 cm soil layer after managed for 13 years, the increasing rate was first slow then fast. (2) There was a correlation between soil nutrient content and management years; management years gave a significant correlation with soil organic matter and total N contents ($P < 0.05$), and a highly significant correlation with total P ($P < 0.01$). But no correlation was observed between soil total K content and management years. These findings suggested that the soil nutrient contents of *Pinus massoniana* forest soil was related to the management years, and provided scientific basis for ecological management and restoration.

Keywords: management years; *Pinus massoniana* forest land; soil nutrition; red soil region in Southern China

土壤侵蚀是指土壤及其母质在外力的作用下, 被破坏、搬运和沉积的过程^[1], 也是人类生存和发展的全球环境问题之一^[2]。土壤侵蚀常常造成土壤养分

的流失^[3], 土壤养分具有涵养水源和保持水土的功能^[4], 又是植物生长所需要的营养成分^[5]。土壤养分的流失不仅会使当地植物生长和发展所需要的营养

收稿日期: 2017-09-18

资助项目: 国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054); 国家科技支撑计划项目“强度侵蚀区退化生态系统修复关键技术的研发与集成”(2014BAD15B02)

第一作者: 毛兰花(1992—), 女, 汉族, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事侵蚀过程与生态调控研究。E-mail: 1428951699@qq.com

通信作者: 查轩(1961—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

物质降低,造成植物发育不良致使物种多样性受到制约,而且也会使当地的土地退化,农业用地减少,影响农业经济的发展,给人类生存与发展带来严重的挑战^[6]。全球 $1.5 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的耕种土地中,由于不合理的农业耕作方式,80%的农业用地遭到中度至重度的土壤侵蚀,10%的遭到轻度至中度侵蚀^[7]。

福建省长汀县是我国南方红壤区马尾松林地土壤侵蚀最为严重的地区之一^[8],通过多年的努力,长汀水土流失的治理取得丰硕的成果。Brown 等^[9]指出植被存在的情况下可以增加雨水入渗,降低地表径流和减少水土流失;孙佳佳等^[10]通过研究红壤区土壤侵蚀与植被叶面积的关系,得出马尾松林草覆盖结构能够增强植被保持水土的能力;杨玉盛等^[11]对花岗岩红壤区严重退化的生态系统通过研究 4 种不同的恢复措施,发现植物多样性增大,植被生态系统得到一定程度的恢复和发展。但马尾松林地仍然存在严重的林下水土流失,呈现出“远看绿油油,近看水土流”的独特景观。在南方红壤区土壤侵蚀研究过程中,大部分学者主要研究降雨坡面产流产沙、泥沙迁移过程对土壤养分流失的影响,耿晓东等^[12]、钱婧^[13]、张会茹等^[14]通过室内人工模拟降雨研究发现红壤区不同坡度和降雨强度对坡面土壤流失量的影响;少部分学者研究土壤养分及集中于不同治理措施对土壤养分的影响,查轩等^[15]研究针叶林地、阔叶林和混交林地对林地土壤养分的影响;马志阳等^[16]研究乔、灌、草复合结构对红壤区土壤侵蚀的影响;谢锦升等^[17]研究马尾松林地 3 种治理措施对红壤区土壤养分的影响,发现乔灌草治理模式保持水土的能力更优;而从时间尺度上,不同年限的同一种治理措施对土壤养分影响的较少。因此,本文主要研究南方红壤区乔灌草混交治理措施下不同治理年限的马尾松林地土壤养分特征及两者之间的相关性,研究土壤养分的变化特征,为马尾松林下生态治理与恢复提供科学依据,对保持水土和减少土壤侵蚀具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省长汀县河田镇位于 $25^\circ 35' - 25^\circ 46' \text{ N}$,

$116^\circ 16' - 116^\circ 30' \text{ E}$,处于中亚热带季风气候区,年平均气温 $17.5 \sim 18.8^\circ \text{ C}$,极端最高温 39.5° C ,最低温 -7.8° C ,雨量充沛,年均降水量 $1\,698.7 \text{ mm}$,主要集中在 3—6 月,10 月至翌年 2 月降雨较少。土壤主要为湿热气候条件下花岗岩淋溶风化发育形成的红壤,土壤可蚀性较强,保水保肥能力弱。植被主要为马尾松针叶林,但土壤肥力低下,存在较大的林下水土流失。

1.2 样品采集与分析

2016 年 8 月选取 2003 年、2006 年、2009 年、2012 年南方花岗岩发育红壤区具有代表性的乔灌草样地,选取未治理的严重侵蚀退化的马尾松地作为对照样地,每种样地大小 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ (表 1),选取 3 个重复样地,沿等高线按“品”字形挖 $50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ (穴面宽 $\times$ 深 $\times$ 底宽)种植穴,种植行间距为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,用挖穴土在下方做埂,每公顷种植乔木(木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)) 600 株,灌木(胡枝子(*Lespedeza bicolor-Turcz*)) 4 200 株,乔、灌比为 1 : 7,每穴施有机肥 0.25 kg,复合肥 0.20 kg,用宽叶雀稗(*Paspalum wetsteinii Hackel*)种子 105 kg/hm^2 或者百喜草(*Paspalum natatu*)种子 45 kg/hm^2 拌有机肥 450 kg 和山地表土 1 200 kg,混匀后撒在种植穴表面。在每个样地中按照“S”形在坡面选取 5 个有代表性的样点,每一个样点采用环刀采集 0—5,5—20,20—40,40—60 cm(土层以下称 A、B、C、D 层)土壤样品,5 个样点同一土层土壤样品混匀后按照四分法取 1 kg 装入土样袋,做好标记,带回实验室自然风干,研磨过筛之后,进行土壤有机质含量及全 N、全 P、全 K 含量的测定。

测定方法:土壤有机质含量、全 N 含量采用 Vario EL III CN 元素分析仪测定;土壤全 P 含量先用浓硫酸和高氯酸消煮,再采用连续流动分析仪测定;土壤全 K 含量采用氢氧化钠熔融,FP640 火焰光度计测定。

1.3 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件对试验数据进行处理。

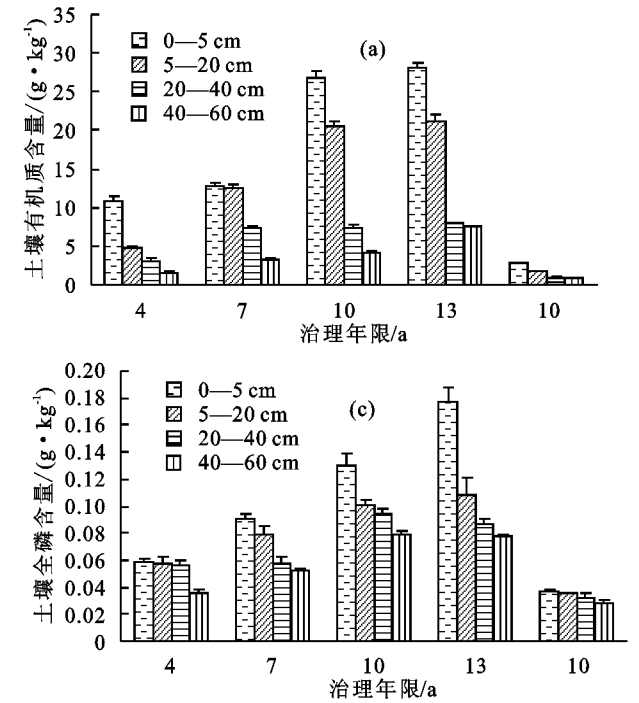
表 1 不同治理年限乔灌草样地概况

样地 编号	开始治理 时间	治理 年限/a	地点	坡度/ (°)	土壤侵蚀程度	
					治理前	现状
M4	2012 年乔灌草混交	4	河田镇卢町火果场	19	强烈	无明显
M7	2009 年乔灌草混交	7	河田镇马坑	20	强烈	无明显
M10	2006 年乔灌草混交	10	河田镇晨光村红畲	20	强烈	无明显
M13	2003 年乔灌草混交	13	河田镇罗屋喂	18	强烈	无明显
DZ	2006 年严重侵蚀退化马尾松林地	10	河田镇来油坑	19	强烈	强烈

2 结果与分析

2.1 不同治理年限样地土壤养分含量特征

2.1.1 不同治理年限样地土壤有机质含量特征 土壤有机质决定土壤保水、保土的有效性,有机质含量的多寡受制于植被凋落物与土壤中动物、微生物的分解^[18]。由图 1(a)可知,土壤有机质含量的变化为 0.81~28.10 g/kg, M4、M7、M10、M13 样地不同土层有机质含量均明显地高于 DZ(对照样地)。随着治理年限的增加,4 个样地土壤有机质含量呈现上升的趋势,且在各土层中呈规律性分布。4 个不同深度土层中,有机质含量随土层的加深而减少,表现为



2.1.2 不同治理年限样地土壤全氮含量特征 从图 1(b)可以看出,土壤全 N 含量的变化为 0.18~1.15 g/kg,除了治理年限最短的 M4 的 B、C、D 层外,4 个样地土壤全 N 含量均显著高于 DZ(对照样地)。随着治理年限的增加,4 个样地 A、B、D 层呈增加趋势, C 层全 N 含量的变化趋势为 M4<M10<M13<M7。4 个样地各土层全 N 含量随土层的加深而减少,这与土壤有机质的变化规律一样。样地治理 4,7 年后,4 个土层土壤全 N 含量变化幅度较小,其变幅分别为 0.18~0.50,0.34~0.77 g/kg;而治理 10,13 年后,4 个土层土壤全 N 含量变化幅度较大,其变幅分别为 0.40~0.95,0.43~1.15 g/kg。在 4 个治理年限中, A、B 两层土壤全 N 含量受其治理年限的影响较大, C、D 两层土壤全 N 含量受其治理年限的影响较小, 4~7 年阶段增速平均每年增加为 0.093 g/kg,7~10 年、10~13 年阶段增速分别为 0.018,0.023 g/kg,增

A>B>C>D。在治理 4,7 年后,4 个土层土壤有机质含量变化幅度较小,其变幅分别为 1.57~10.80, 3.19~12.67 g/kg;而治理 10,13 年后,4 个土层土壤有机质含量变化幅度相对较大,其变幅分别为 4.05~26.72,7.53~28.10 g/kg。在 4 个治理年限阶段中,A、B 两层土壤有机质含量受其治理年限的影响较大,C、D 两层土壤有机质含量受其治理年限影响较小。4~7 年、7~10 年、10~13 年土壤有机质含量平均每年增加 1.28,1.92,0.50 g/kg,增速的变化为先快后慢,7~10 年阶段增速最快,增速最慢的为 10~13 年阶段。

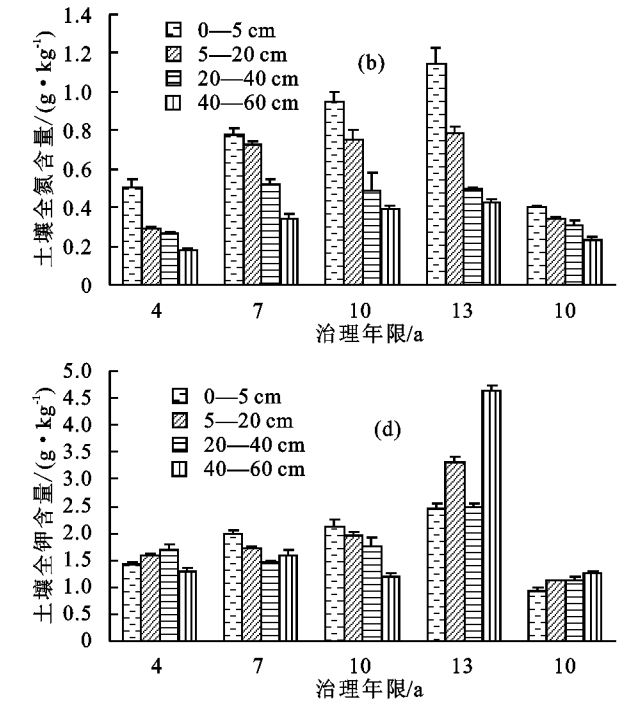


图 1 不同治理年限样地土壤养分变化规律

速最快的阶段为 4~7 年阶段。

2.1.3 不同治理年限样地土壤全磷含量特征 从图 1(c)可以看出,土壤全 P 含量的变化为 0.03~0.18 g/kg,除 M4 的 D 土层外,4 个样地土壤全 P 含量均显著高于 DZ(对照样地)。4 个样地不同深度土层中土壤全 P 含量随着治理年限的增加而增加,且在各土层中呈规律性分布。除 M4 外,土壤全 P 含量随土层深度的加深而减少。在治理 4,7 年后,4 个土层土壤全 P 含量变化幅度较小,其变幅分别为 0.04~0.06,0.05~0.09 g/kg;而治理 10,13 年后,4 个土层土壤全 P 含量变化幅度较大,其变幅分别为 0.08~0.13,0.04~0.18 g/kg。在 4 个治理年限阶段中, A 层土壤全 P 含量受其治理年限的影响较大,B、C、D 层土壤全 P 含量受其治理年限影响较小,4~7 年、7~10 年、10~13 年土壤全 P 含量平均每年分别增加 0.006,0.010,0.004 g/kg,治理前期土壤全 P 增速逐

渐加快,在 7~10 年阶段达到最大,随后增速减小,增速最慢的是 10~13 年阶段。

2.1.4 不同治理年限样地土壤全钾含量特征 从图 1(d)可以看出,土壤全 K 含量的变化为 0.92~4.65 g/kg,4 个样地土壤全 K 含量均显著高于 DZ(对照样地)。随着治理年限的增加,土壤全 K 含量与土壤有机质、全 N、全 P 表现的规律不同,A、B 土层为 $M4 < M7 < M10 < M13$,C 土层为 $M7 < M4 < M10 < M13$,D 土层为 $M10 < M4 < M7 < M13$,且不随土层深度的增加而减少,在治理 13 年后,土壤全 K 含量在 D 层达到最大。在治理 4,7,10 年后,4 个土层土壤全 K 含量变化幅度较小,其变幅分别为 1.29~1.70,1.44~1.98,1.19~2.12 g/kg;而治理 13 年后,4 个土层土壤全 K 含量变化幅度较大,其变幅分别为 2.46~4.64 g/kg。在 4 个治理年限阶段中,4~7 年、7~10 年、10~13 年阶段土壤全 K 含量平均每年增加 0.06,0.02,0.49 g/kg。土壤全 K 含量增速呈先慢后快趋势,增速最快的为 10~13 年阶段,增速最慢的为 7~10 年阶段。

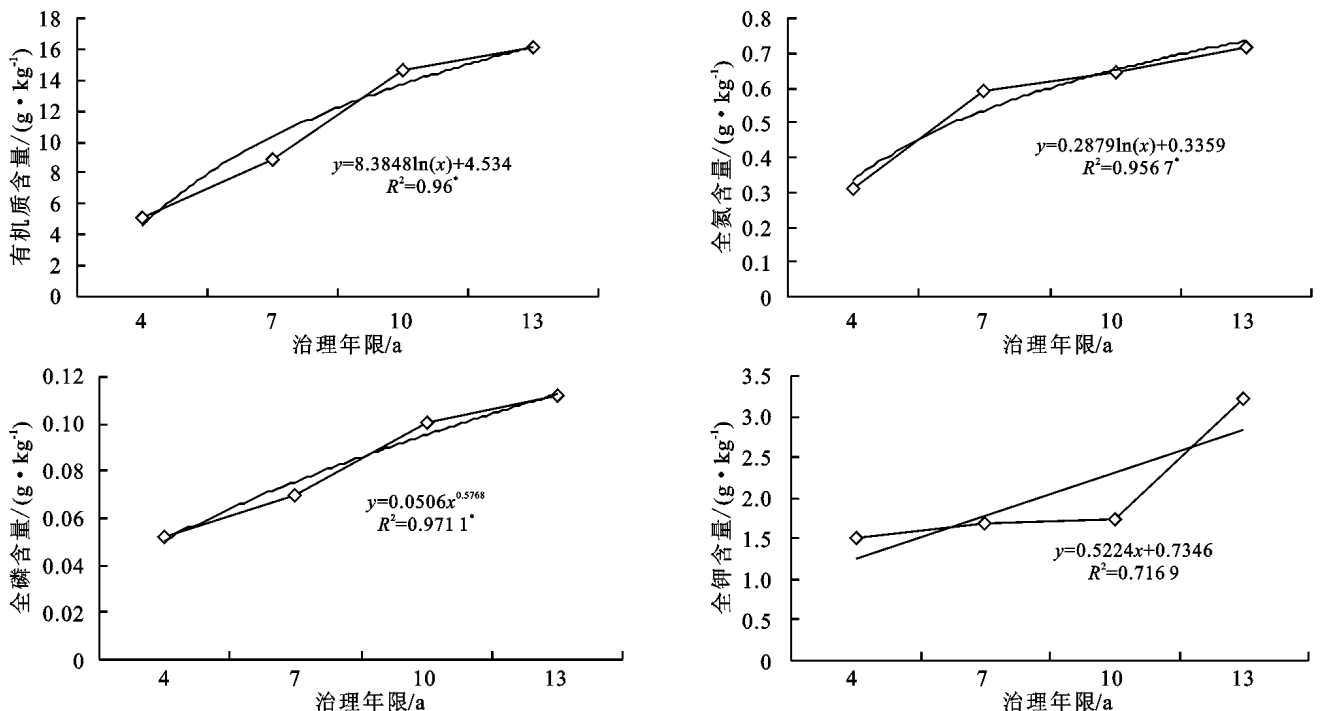
2.2 不同治理年限土壤养分之间的相关性分析

利用 Pearson 相关分析法分析不同治理年限的土壤养分之间的相关性(表 2)。结果表明,A、B、C、D 土层中各土壤养分含量之间均存在极显著或者显著相关关系。随着治理年限的增加,土壤有机质含量与全 N 含量之间在 A、B、C 土层均呈显著相关关系($P < 0.05$),D 土层无相关关系;土壤有机质含量与全 P 含

量之间在 A 土层存在显著相关关系($P < 0.05$),在 B 土层存在极显著相关关系($P < 0.01$),C、D 土层均不存在相关关系;土壤有机质含量与全 K 含量之间在 A 土层存在显著相关关系($P < 0.05$),在 B、C、D 土层之间均不存在相关性;土壤全 N 含量与全 P 含量之间在 A 土层存在极显著相关性($P < 0.01$),在 B、D 土层存在显著相关性($P < 0.05$),在 C 土层不存在相关性;土壤全 N 含量与全 K 含量之间在 A 土层存在显著相关关系($P < 0.05$),在 B、C、D 土层之间均不存在相关性;土壤全 P 含量与全 K 含量之间在 A 土层存在显著相关关系($P < 0.05$),在 B、C、D 土层之间均不存在相关性。

2.3 土壤养分与治理年限的相关性

经过 4~13 年乔灌草混交治理措施下,对样地土壤有机质含量与治理年限进行相关性分析(图 2),表明土壤有机质含量与治理年限呈显著相关关系($P < 0.05$),土壤有机质随着治理年限的增加呈现增加趋势;对土壤全 N 含量与治理年限进行相关分析(图 2),表明土壤全 N 含量与治理年限呈显著相关关系($P < 0.05$),土壤全 N 含量随着治理年限的增加呈增加趋势;对土壤全 P 含量与治理年限进行相关分析(图 2),表明土壤全 P 含量与治理年限呈极显著相关关系($P < 0.01$),土壤全 P 含量随着治理年限的增加呈增加趋势;对土壤全 K 含量与治理年限进行相关分析(图 2),表明土壤全 K 含量与治理年限不存在相关关系,土壤全 K 含量随着治理年限的增加而逐渐增加。



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

图 2 不同治理年限与样地土壤养分含量相关性分析

表 2 不同治理年限土壤养分之间的相关性

土层	有机质与全氮	有机质与全磷	有机质与全钾	全氮与全磷	全氮与全钾	全磷与全钾
A	0.950*	0.956*	0.921*	0.990**	0.970*	0.947*
B	0.941*	0.961**	0.768	0.902*	0.690	0.837
C	0.922*	0.846	0.656	0.665	0.430	0.765
D	0.876	0.869	0.877	0.940*	0.599	0.533

注: * 表示显著差异 ($P<0.05$); ** 表示极显著差异 ($P<0.01$)。

3 讨论

土壤有机质与氮、磷、钾是土壤养分的重要指标^[19]。在乔灌木混交治理措施下,通过 4 个样地不同治理年限研究土壤养分的基本状况。治理 4~13 年发现,M4、M7、M10、M13 样地的有机质含量和氮磷钾含量均高于 DZ(对照样地),尤以治理年限 13 年的土壤养分最高,说明随着样地治理年限的增加,植被恢复可有效地减少水土流失,土壤养分含量逐渐提高。土壤有机质含量随着治理年限的增加呈上升的趋势,同时,马尾松林地经过 13 年的治理,0—5 cm 土层土壤有机质含量为 28.07 g/kg,接近福建省红壤养分含量的平均值(45.40 g/kg)^[20],说明随着治理年限的增加,乔灌木混交林地的植被恢复所产生的枯枝落叶分解产生的有机质不断累积,有效减少马尾松林地的水土流失;而 5—20,20—40,40—60 cm 土层土壤有机质含量只有 21.07,7.90,7.53 g/kg,表明马尾松林地土壤的恢复是缓慢的过程,陈海滨等^[21]在研究矿区开采地的治理也表示土壤的恢复是一个缓慢发展的过程,治理初期植物难以适应恶劣的环境,一些植被都无法成活^[22],之后种植了胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz.*)、宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii Hackel*)等本地草种,才使得土壤有机质含量有所提高。

马尾松林地治理初期土壤全 N 含量比较低,仅为 0.18 g/kg,经过 13 年治理,0—5 cm 土壤全 N 含量为 1.15 g/kg,福建土壤全 N 平均含量为 1.36 g/kg^[23],比较接近全省的平均含量,可见马尾松林地经过长时间的治理,植被枝叶能抵挡雨水的冲刷,减少林下土壤养分的流失,有利于土壤养分的下渗。吕薇等^[24]研究渭北保护性轮耕下土壤有机质含量与土壤全 N 含量的相关性与本研究的结论存在差异,0—5,5—20,20—40 cm 土层之间土壤有机质含量与土壤全 N 含量存在显著相关性($P<0.05$),可能由于南北地区的水、热、气条件不同,影响土壤有机质含量与土壤全 N 含量的动态变化。

南亚热带地区的土壤含磷浓度普遍较低,中国土壤含磷浓度大约为 0.2~1.0 g/kg^[23],根据《中国土壤数据库》实时更新的福建省龙岩市自然生态系统土

壤全 P 平均含量为 0.25 g/kg^[25],马尾松林地经过 13 年的治理 0—5 cm 土壤全 P 含量为 0.18 g/kg,比较接近平均值,而未治理的严重侵蚀马尾松林地的全 P 含量仅为 0.03 g/kg,土壤全 P 含量的缺乏抑制了植被的生长,导致改善研究区土壤环境的工作更为困难。土壤全 P 含量 A 层受治理年限的影响较大,杨万勤^[26]就植被生态系统与土壤 P 含量变化特征做了研究,发现随着治理年限的增加乔灌木凋落物对 A 层土壤 P 含量起着决定性作用,而只有植被生态系统足够丰富的时候,B、C、D 层全 P 含量受治理年限的作用才会比较显著;熊毅等^[27]研究表明,土壤全 P 含量与土壤有机质含量存在明显的相关性。本试验对土壤有机质和土壤全 N 含量进行相关性分析发现,土壤有机质含量与全 P 含量在 A 土层存在显著相关关系($P<0.05$),在 B 土层存在极显著相关关系($P<0.01$),说明随着治理年限的增加,马尾松林地植被生态系统的恢复和发展有效地提高了 B 层土壤全 P 含量。

土壤全 K 含量在治理 4,7,10 年后,4 个土层土壤全 K 含量变化幅度较小;治理 13 年后,4 个土层土壤全 K 含量变化幅度相对较大,与土壤有机质、全 N、全 P 含量随着土层深度的加深而减少的变化规律不同,治理 13 年后,土壤在 D 层全 K 含量最高,说明随着治理年限的增加,乔灌木的根系发达对土壤全 K 含量起决定性作用,乔木、灌木植被恢复的越好,根系越发达,土壤全 K 含量越高^[28]。南方红壤区侵蚀退化地马尾松林地群落结构比较单一,缺少物种多样性,不利于减少土壤侵蚀,林下植被是森林生态系统的重要组成部分,林下植被的恢复有利于养分循环与保持水土。乔灌木混交治理措施有效地丰富了林下植被,促进了土壤肥力的提高和土壤结构的改善,有利于马尾松林地生态系统的恢复与重建,减少水土流失。

4 结论

(1)随着治理年限的增加,马尾松林地土壤有机质含量和全 N、全 P、全 K 含量均显著增加;土壤有机质含量、全 N 含量、全 P 含量随着土层的加深表现为 A>B>C>D,而土壤全 K 在治理 13 年后含量最高在 40—60 cm 土层。

(2)土壤有机质含量与全 N、全 P、全 K 含量之间,土壤全 N 含量与土壤全 P、K 含量均存在显著或极显著相关关系($P<0.01$);在 A 土层土壤全 P 含量与土壤全 K 含量之间存在显著相关关系($P<0.05$)。

(3)随着治理年限的增加,土壤有机质含量与治理年限呈现显著线性关系($P<0.05$),土壤全 N 含量与治理年限存在显著相关关系($P<0.05$),土壤全 P 含量与治理年限存在极显著相关关系($P<0.01$),土壤全 K 含量与治理年限不存在线性关系。

参考文献:

- [1] 陈世发. 基于 GIS 的亚热带山地土地利用与土壤侵蚀关系研究:以粤北山区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 80-85.
- [2] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 12-16.
- [3] 吴东,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区典型退耕还林措施土壤养分流失控制[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3825-3831.
- [4] 付兴涛,张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 91-98.
- [5] 李丹,康萨如拉,赵梦颖,等. 内蒙古羊草草原不同退化阶段土壤养分与植物功能性状的关系[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10): 991-1002.
- [6] Greenland D J. Soil management and soil degradation[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 32(3): 301-322.
- [7] Wang G, Wu B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2014, 514(3): 180-191.
- [8] Pimentel D, Burgess M. Environmental and economic benefits of reducing pesticide use[M]. Integrated Pest Management Reviews, 2014, 3(3): 127-139.
- [9] Brown L C, Norton L D. Surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and Formation[J]. Transaction of the ASAE, 1994, 37(5): 1515-1524.
- [10] 孙佳佳,于东升,史学正,等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1060-1066.
- [11] 杨玉盛,何宗明,罗学升,等. 严重退化生态系统不同恢复和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.
- [12] 耿晓东,郑粉莉,张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.
- [13] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [14] 张会茹,郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [15] 查轩,黄少燕,林金堂. 林地针叶化对土壤微生物特征影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 18-21.
- [16] 马志阳,查轩. 南方红壤区侵蚀退化马尾松林地生态恢复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 188-193.
- [17] 谢锦升,林瑞余,黄荣珍,等. 严重侵蚀红壤不同治理模式群落 N、P 养分循环研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 16-19.
- [18] 刘效东,乔玉娜,周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.
- [19] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for Csaturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [20] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州:福建科学技术出版社, 1991.
- [21] 陈海滨,陈志彪,陈志强,等. 不同治理年限的离子型稀土矿区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 258-266.
- [22] Hou E Q, Chen C R, Wen D Z, et al. Phosphatase activity in relation to key litter and soil properties in mature subtropical forests in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 515/516: 83-91.
- [23] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 1 版. 北京:中国农业出版社, 1998.
- [24] 吕薇,李军,岳志芳,等. 轮耕对渭北旱塬麦田土壤有机质和全氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3186-3200.
- [25] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库[DB/OL]. (2010-12-01) [2017-09-08]. [http://vdb3.soil.csdb.cn/front/detail-%E5%9C%9F%E7%A7%8D%E6%95%B0%E6%8D%AE%E5%BA%93\\$%valum?id=36](http://vdb3.soil.csdb.cn/front/detail-%E5%9C%9F%E7%A7%8D%E6%95%B0%E6%8D%AE%E5%BA%93$%valum?id=36).
- [26] 杨万勤. 土壤生态退化与生物修复的生态适应性研究[D]. 重庆:西南农业大学, 2001.
- [27] 熊毅,李庆奎. 中国土壤[M]. 2 版. 北京:科学出版社, 1987.
- [28] 李昌龙,马瑞君,王继和,等. 甘肃民勤连古城自然保护区优势种群结构和动态研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1628-1636.