

严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复 土壤养分的制约性因子

刘根华^{1,2}, 查轩^{1,2}, 周文芳^{1,2}, 白永会^{1,2}, 康佩佩^{1,2}, 王庚^{1,2}, 黄少燕^{1,2}

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

摘要: [目的] 揭示马尾松(*Pinus massoniana*)林地植被恢复的土壤养分制约性因子, 为严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复提供理论依据。[方法] 通过在福建省长汀县河田镇花岗岩风化红壤区, 植被恢复差异较大的4种马尾松样地的0—5, 5—20, 20—40 cm的土壤养分试验分析。[结果] (1) 恢复较差的马尾松林地的有机质、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量均较低, 土壤保肥能力差, 养分易随土壤侵蚀而流失。(2) 所有样地的有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量变化规律基本上为: 恢复较差<恢复中等<恢复较好<恢复好。(3) 有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾极显著正相关($p < 0.01$), 且在第1主成分上的载荷分别为0.921, 0.931, 0.974, 0.906, 0.874。(4) 4种恢复样地土壤表层全钾差异不显著, 其他层土壤规律不明显, 植被恢复好的样地的pH值最小, 但是马尾松林下植被生长良好。[结论] 有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾是马尾松林地植被恢复主要制约因子, 全钾、pH值不是马尾松林地植被恢复制约性因子。

关键词: 马尾松林地; 土壤养分; 植被恢复; 制约性因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0034-06

中图分类号: S157.1, S714.6

文献参数: 刘根华, 查轩, 周文芳, 等. 严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复土壤养分的制约性因子[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 034-039. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.013

Soil Nutrient Restriction Factors in Serious Eroded and Degraded *Pinus Massoniana* Woodland

LIU Genhua^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, ZHOU Wenfang^{1,2}, BAI Yonghui^{1,2},
KANG Peipei^{1,2}, WANG Geng^{1,2}, HUANG Shaoyan^{1,2}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Sub-tropical Resources and Environment, Fuzhou, Fujian 350007, China; 2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: [Objective] We aim to reveal soil nutrient limiting factors of vegetation restoration in *Pinus massoniana* forests, in order to provide a theoretical basis for the restoration of the degraded *P. massoniana* forests. [Methods] The experimental analysis of chemical properties was conducted in four completely different forest vegetation plots at 0—5, 5—20 and 20—40 cm depths of soil layers in the granite weathered red soil region of Hetian Town, Changting County, Fujian Province. [Results] (1) The organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium, available potassium were lower in the degraded *P. massoniana* forest soil. The ability of soil keeping fertilizer was poor, and fertility was lost easily with soil erosion. (2) In all plots, the variation of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, potassium showed as: poor recovery<moderate recovery<relative good recovery<good recovery. (3) Organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available potassium showed significant positive correlations($p < 0.01$), and the load on the first principal component were 0.921, 0.931, 0.974, 0.906 and 0.874, respectively. (4) The variation of total K in four restored plots was not sig-

收稿日期: 2016-03-25

修回日期: 2016-06-06

资助项目: 国家科技支撑计划项目“强度侵蚀区退化系统修复关键技术的集成与示范”(2014BAD15B02); 国家重点基础研究发展计划 973 项目“南方红壤区水土流失综合治理范式及调控机理研究”(2007CB407207)

第一作者: 刘根华(1988—), 男(汉族), 江西省井冈山市人, 硕士研究生, 主要从事侵蚀过程与生态调控研究。E-mail: 1352800081@qq.com。

通讯作者: 查轩(1961—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持生态方面的研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn。

nificant in surface soil, and there was not obvious rule in the other soil layer. The pH value of good restored plot was minimum, and vegetation under *P. massoniana* could grow well. [Conclusion] Organic, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available potassium are the main limiting factors in vegetation restoration, and the total potassium, pH value are not the main limiting factors in vegetation restoration.

Keywords: *Pinus massoniana* woodland; soil nutrient properties; revegetation; limiting factor

中国水土流失面积大,分布广,治理任务艰巨,是世界上水土流失最为严重的国家之一^[1]。其中南方红壤区面积占国土面积的 22.7%^[2]。但是由于红壤本身酸、瘦、黏等弱点以及降雨的时空分布不均和不合理的人为开发利用,造成了水土流失、土壤退化、土壤污染等问题^[3],红壤地区已经成为中国水土流失范围广、程度较高的地区,严重程度仅次于黄土高原^[4]。自 20 世纪 80 年代以来,南方红壤丘陵区营造和恢复了大面积的马尾松(*Pinus massoniana*)林和其他经济林,使得各省的森林覆盖率有了明显的提高(平均达到了 52.87%),但仍然是“远看青山在,近看水土流”的景象,马尾松林下水土流失成为了南方红壤丘陵区水土流失治理的一个比较突出问题^[5]。随着马尾松植被恢复,出现了林下土壤结构变差,土壤养分下降,土壤酸化,植物多样性减少等一系列问题。针对这些问题,众多学者已经做了大量的研究,如史东梅等^[6]对马尾松土壤的物理性质变化做了系统的研究。王晓龙等^[7]研究马尾松林地土壤生物学质量变化规律。张文猛等^[8]对马尾松人工林土壤酸化规律做了初步的分析和研究。但是这些研究大多集中在土壤物理结构,土壤生物学变化特征,土壤酸化等方面,对严重侵蚀马尾松林地植被恢复的土壤养分制

约性因子研究较少。本文旨在通过对花岗岩风化红壤区马尾松植林地被恢复差异较大的 4 种样地土壤养分研究,揭示限制马尾松林地植被恢复的土壤养分制约性因子,为马尾松林地的植被恢复提供理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 样品采集

本文选取长汀县土壤类型、母质、坡度、树龄相近、恢复时间相近的 4 种类型的马尾松恢复样地。样地 I 为马尾松植被恢复较差的林地,样地 II 为马尾松植被恢复中等的林地,样地 III 为马尾松植被恢复较好的林地,样地 IV 为植被恢复好的林地。在每个类型的试验地选取 20 m×20 m 样地并设置 3 个重复,样地间距大于 10 m。在每个样地内均匀布设 5 个 2 m×2 m 小样方,在各个小样方内用直径为 4 cm 的土钻取 0—5,5—20,20—40 cm 3 层土样,5 个采样点在同一土层深度的土均匀混合后采用四分法取出大概 1 kg 的土,用保鲜袋装好,做好标记,装袋带回实验室风干,磨碎以便测定土壤养分。每个类型样地每层的数据取 3 个重复的平均值。表 1 为 4 种样地的基本概况。

表 1 不同样地基本概况

样地编号	坡度/(°)	恢复程度	植被覆盖度/%	平均树高/m	平均胸径/cm	植被状况
I	17	较差	15	3.1~4.6	4.3~6.6	马尾松
II	18	中等	45	4.7	9.04	马尾松,芒萁
III	18	较好	80	14.3	16.9	马尾松,胡枝子、紫穗槐、芒萁
IV	17	好	95	37	21.5	马尾松、黄瑞木、赤楠、毛冬青、卵叶小蜡、油茶、黄桅子

1.2 测定方法

按不同的试验分析要求分取、磨细、过筛备用。选取有代表性的有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾 6 项主要土壤养分元素含量以及土壤 pH 值、各种指标的测定方法如下^[9]。土壤有机质测定,土壤全氮采用 CN 元素分析仪,仪器为德国 Elementar 公司 Vario EL III 元素分析仪^[10]。土壤全磷采用浓硫酸—高氯酸消煮,采用连续流动分析仪测定。土壤全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法。土壤速效磷采用双酸浸提,连续流动分析仪测定。土壤速效钾采用乙

酸铵浸提—火焰光度计法。pH 值采用水土比 2.5:1 浸提法,采用 pH 计测定。

1.3 数据处理

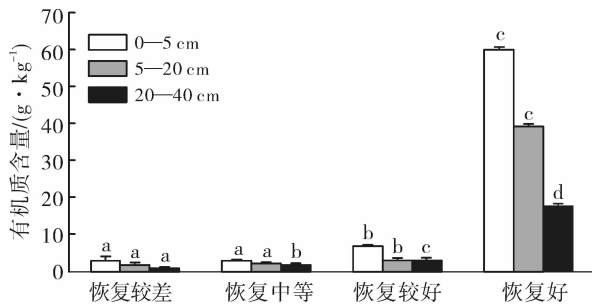
本文采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理。

2 结果分析与讨论

2.1 土壤有机质和土壤全氮分析比较

从图 1 可以看出,在 0—5 cm 土层,恢复中等、恢复较好、恢复好的有机质含量分别是恢复较差样地的

1.04, 2.40, 21.19 倍, 5—20 cm 土层中分别是其 1.35, 1.84, 24.04 倍, 20—40 cm 土层中分别是其 1.92, 3.26, 18.78 倍。由以上 3 层土壤有机质的倍数关系可以看出, 不同恢复样地有机质含量的差别巨大, 在 5—20 cm 甚至达到 24.04 倍。恢复较好、恢复好与恢复较差样地的有机质含量在所有土层中都有显著性差异。恢复中等与恢复较差样地在第 3 层有显著性差异, 1, 2 层差异不显著 ($p < 0.05$)。



注: 不同小写字母表示不同土层土壤养分含量差异显著, 显著性水平为 $p < 0.05$ 。下同。

图 1 不同样地土壤有机质含量比较

有机质随着土层深度的增加差异逐渐减小, 这是由于凋落物一般都在表层, 有机质主要来自凋落物的分解。土壤有机质含量大小为: 恢复较差 < 恢复中等 < 恢复较好 < 恢复好, 其中恢复好的样地远远大于其他样地。恢复中等样地表层有一定芒萁, 植被覆盖度中等, 凋落物较少, 所以表层比恢复较差的样地高出 4%。恢复较好样地的各种植被生长良好, 植被覆盖度较高, 所以有机质含量大于恢复较差、恢复中等的样地, 但是小于恢复好的样地。恢复好的样地由于植被生长良好, 植被覆盖度最高, 凋落物最多, 所以有机质含量最大。

从图 2 可以看出, 土层全氮含量为: 恢复较差 < 恢复中等 < 恢复较好 < 恢复好。4 种恢复样地全氮含量都是随土层深度的增加而减少, 所有土层中恢复较差样地的全氮含量都是最低的。恢复较差、恢复中等样地的土壤表层、次表层全氮含量差不显著, 第 3 层差异显著。而恢复较好、恢复好和恢复较差样地所有土层的土壤全氮含量差异显著。这与赵汝东等^[11]认为土壤全氮含量及其有效性偏低会制约退化马尾松生态系统的恢复相一致。有机质和全氮相关性极显著 ($p < 0.01$)。说明有机质和全氮有密切的联系。由以上分析可知, 不同恢复样地间有机质和全氮养分差异较大。随着土壤的有机质和全氮增加, 植被覆盖度和恢复程度也在增加, 说明有机质和全氮对植被恢复制约较大。

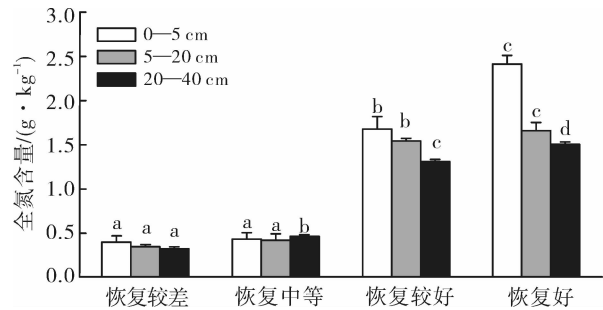


图 2 不同样地土壤全氮含量比较

2.2 土壤全磷和速效磷的分析比较

从图 3 可以看出, 各样地的全磷含量在 0.037~0.180 g/kg。全磷含量的大小为: 恢复较差 < 恢复中等 < 恢复较好 < 恢复好。除了恢复中等表层外, 其他土层全磷含量是恢复中等、恢复较好、恢复好与恢复较差样地差异显著。在 0—5 cm 土层中, 恢复中等、较好、好是恢复较差的 1.49, 3.06, 4.87 倍。在 5—20 cm 土层中是 1.37, 1.55, 4.37 倍。各样地全磷随着土层深度的增加, 各样地间的差异有减小的趋势, 尤其是恢复较好的样地, 由原来的 3.06 倍, 很快就下降到 1.55 倍, 说明植被对全磷的需求还是很大, 所以在恢复马尾松林下植被时全磷的作用尤为明显^[12]。

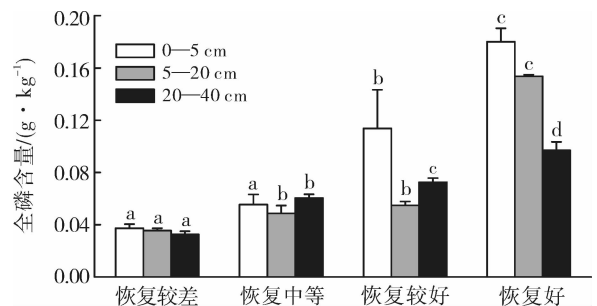


图 3 不同样地土壤全磷含量比较

从图 4 可以看出, 表层和次表层速效磷含量为: 恢复较差 < 恢复中等 < 恢复较好 < 恢复好, 而在 20—40 cm 土层规律不明显。在 0—5, 5—20, 20—40 cm 的土层中恢复中等的样地与恢复较差的样地差异不明显, 恢复较好的样地分别是恢复较差样地的 5.43, 3.49, 1.33 倍, 恢复好的样地分别是 6.33, 5.13, 2.5 倍, 后面 2 个样地速效磷变化规律和植被恢复程度一致, 但是随土层深度的增加而减少。速效磷恢复中等和恢复较差的样地速效磷含量都不高, 这是由于样地植被覆盖度低, 雨水冲刷厉害, 土壤的速效磷容易被土壤侵蚀带走。同时由于热带亚热带地区土壤高度风化以及强烈的固磷能力^[13], 土壤速效磷含量较低。随着土壤的全磷和速效磷增加, 植被覆

盖度、恢复程度也在增加,说明全磷和速效磷亏缺对植被恢复也有较大的影响。这也符合热带亚热带林地缺磷的观点^[14]。

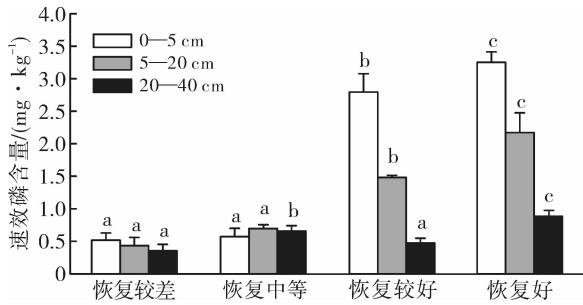


图 4 不同样地土壤速效磷含量比较

2.3 土壤全钾和速效钾的分析比较

从图 5 可以看出,表层土壤全钾大小表现为:恢复较差<恢复中等<恢复较好<恢复好,但是恢复中等、恢复较好、恢复好的样地表层土壤差异不显著,其他层土壤规律不明显,变化规律并没有和植被恢复程度,覆盖度变化一致。恢复中等样地 5—20 cm 土层在所有样地中全钾含量最小,比恢复较差样地还低了 24%。恢复好的林地,马尾松、黄瑞木、赤楠等多种植物混交,地表植被覆盖率最高,腐殖质层厚,但是土壤全钾的 0—5 cm 较低,而在 5—20 cm 层最高,这可能是全钾受淋溶作用富集于次表层。但是于由矿物钾占土壤全钾的 90%~95%,释放缓慢,所以很难被植物吸收利用^[15]。从以上可以看出,全钾不是植被恢复的制约因子。

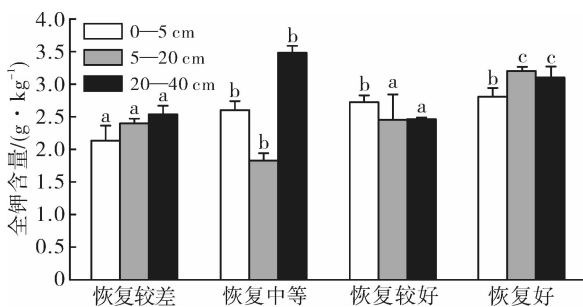


图 5 不同样地土壤全钾含量比较

土壤速效钾是指吸附于土壤胶体表面代换性钾和土壤溶液钾离子,含量的高低常被作为判断土壤钾素丰缺的重要指标^[16]。

由图 6 可以看出,各样地速效 K 含量表现出:恢复较差<恢复中等<恢复较好<恢复好。恢复较好、恢复好的样地的土壤养分与恢复较差的样地差异显著。恢复好的样地表层速效钾含量最高,在表土层达到 115 mg/kg。土壤速效钾的变化与植被恢复程度,

覆盖度变化基本一致,所以速效钾也是植被恢复制约因子之一。

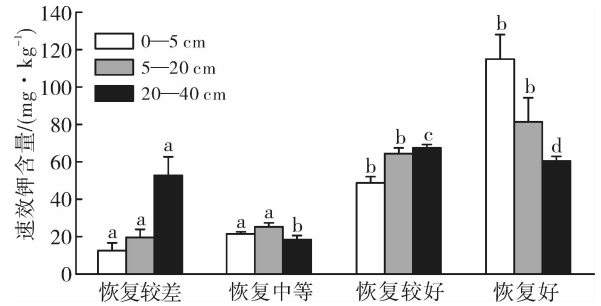


图 6 不同样地土壤速效钾含量比较

2.4 土壤 pH 值的分析比较

研究显示有关马尾松林地土壤 pH 值研究结论并不一致,如崔宁洁等^[17]研究认为马尾松成熟林土壤 pH 值比中林显著升高。秦娟等^[18]研究表明马尾松不同林型的土壤 pH 值差异不显著。本文与杨平等^[19]研究相一致。

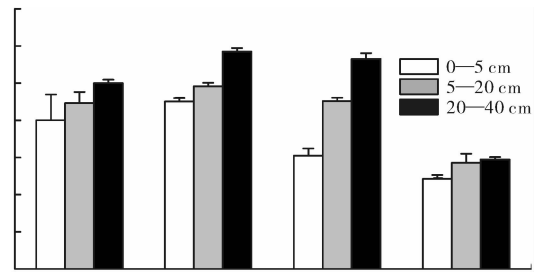


图 7 不同样地土壤 pH 值比较

从图 7 可以看出,所有恢复样地的土壤 pH 值均较低,土壤 pH 值介于 4.48~5.02。各样地表层土壤的 pH 值相对于其他土层都是最低,随着土层深度的增加 pH 值增加。恢复好的样地在所有土层中 pH 值都是最低的,主要可能是恢复好的马尾松样地植物凋落物的腐化和根际分泌物,使土壤酸化。所有土壤层的 pH 值大小是:恢复好<恢复较好<恢复较差<恢复中等,说明在马尾松林的恢复过程中表层土壤 pH 值是先增加后减少。由表 2 可以看出,pH 值与有机质、全氮、全磷、速效磷呈现出极显著负相关性 ($p<0.01$)。说明在低 pH 值下土壤养分反而更高。在 pH 值最小的条件下,芒萁、胡枝子、紫穗槐等能生长良好,说明这些植物能够适应较低的 pH 值,综上所述土壤酸化不是植被恢复的主要限制因子。

2.5 土壤养分指标的相关性分析

对各项养分性质进行相关分析结果如表 2 所示,从表 2 中可以看出,大部分土壤养分指标具有相关性,pH 值与全氮、全磷、速效磷都是极显著负相关。

有机质与全磷的相关系数甚至达 0.920,速效钾与全氮的相关系数达 0.857;有机质、全氮、全磷、速效磷

及速效钾值的相关性极显著,而全钾与其他指标的相关性不明显。

表 2 不同样地土壤养分指标的相关性

统计项	有机质	全氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾	pH 值
有机质	1.000	0.760**	0.920**	0.766**	0.389	0.814**	-0.752**
全氮		1.000	0.877**	0.855**	0.363	0.887**	-0.698*
全磷			1.000	0.879**	0.502*	0.811**	-0.764**
速效磷				1.000	0.302	0.712**	-0.763**
全钾					1.000	0.306	-0.225
速效钾						1.000	-0.562
pH 值							1.000

注: * 为 $p < 0.05$ 的显著性水平; ** 为 $p < 0.01$ 的显著性水平。

2.6 土壤养分指标的主成分分析

因子变量的特征值和方差贡献率是用来衡量因子的重要程度,由表 3 可以看出,特征值大于 1 的主成分有 2 个,其中前 2 个主成分贡献率分别为 73.311%,12.365%,累计贡献率达 85.675%。表明在土壤养分中,有机质、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 值,7 个指标所显示的信息可以由前 2 个主成分表示。

从表 4 来看,有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾在第 1 主成分上都具有较高的载荷,载荷值分别为 0.921,0.931,0.974,0.906,0.874。说明有机质、全氮、速效磷、全磷、速效钾与第 1 主成分有较高的相关性,与土壤的养分关系密切,可以表明该地土壤养分的主要特征。同时,从表 4 中可以看出,第 1 主成分的方差贡献率最大,达到 73.311%。因此,第 1 主成

分是严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复的综合制约因子。

在主成分 2 上,全钾的载荷较高,载荷值为 0.879,而且是正向载荷。但是结合柱状图分析说明全钾不是影响马尾松林地植被恢复的因子。

表 3 不同样地土壤养分指标主成分的特征值与方差贡献率

主成分	特征值	方差贡献率	累计贡献率
1	5.132	73.311	73.311
2	0.866	12.365	85.675
3	0.475	6.790	92.464
4	0.276	3.945	96.409
5	0.172	2.461	98.870
6	0.055	0.792	99.662
7	0.024	0.338	100.000

表 4 不同样地土壤养分指标主成分的特征值与载荷

项目	有机质	全氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾	pH 值
主成分 1	0.921	0.931	0.974	0.906	-0.817	0.874	-0.817
主成分 2	-0.020	-0.072	-0.330	-0.149	0.879	-0.075	0.233

3 结论

(1) 恢复较差的马尾松林地的所有土层土壤有机质、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量均较低。说明恢复较差的马尾松林地虽然有少量马尾松覆盖,但是土壤肥力低,保肥能力差,养分易随土壤侵蚀而流失。

(2) 所有样地的有机质、全氮、全磷、速效磷,速效钾含量变化规律基本上都是:恢复较差 < 恢复中等 < 恢复较好 < 恢复好,变化规律与植被恢复程度,覆盖度变化一致。有机质、全氮、全磷、速效磷,速效钾都是极显著正相关($p < 0.01$)且在第 1 主成分上都具有较高的载荷,载荷值分别为 0.921,0.931,

0.974,0.906,0.874。说明这 5 种养分关系密切且可以表示该地土壤养分的主要特征,是严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复的综合制约因子。

(3) 4 种恢复样地土壤表层全钾差异不显著,其他层土壤规律不明显而且由于矿物钾占土壤全钾的 90%~95%,释放缓慢,很难被植物吸收利用。4 种恢复样地的土壤 pH 值均较低,土壤 pH 值介于 4.48~5.02 范围,其中植被恢复好的样地 pH 最小,在 pH 值最小的条件下,芒萁、胡枝子、紫穗槐等能生长良好,说明这些植物能够适应较低的 pH 值。所以全钾、pH 值不是严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复制约性因子。

(4) 本研究还存在着一些不足和需要完善的地方,如未分析土壤微生物,土壤酶,土壤动物等对马尾松林下植被恢复作用,这些都是今后需要研究的问题。

[参 考 文 献]

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等. 我国水土流失现状和防治对策分析[J]. 水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [2] 贺湘逸,谢为民,邓斯捷,等. 我国红黄壤利用改良的成就和问题[J]. 土壤通报,1983(2):1-4.
- [3] 莫江明, Sandra Brown, 彭少麟, 等. 林下层植物在退化马尾松林恢复初期养分循环中的作用[J]. 生态学报, 2002,22(9):1407-1413.
- [4] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [5] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [6] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):35-39.
- [7] 王晓龙,胡锋,李辉信,等. 侵蚀退化红壤自然恢复下土壤生物学质量演变特征[J]. 生态学报,2007,27(4):1404-1411.
- [8] 张文猛,王兴祥. 亚热带典型人工林土壤酸化特征及其生物学机理初步分析[J]. 土壤,2012,44(6).
- [9] 张万儒,杨光澄,屠星南. 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [10] 张威,刘宁,吕慧捷,等. TruSpec CN 元素分析仪测定土壤中碳氮方法研究[J]. 分析仪器,2009(3):46-49.
- [11] 赵汝东,樊剑波,何园球,等. 退化马尾松林下土壤障碍因子分析及酶活性研究[J]. 土壤学报,2011,48(6):1287-1292.
- [12] 陈志彪,朱鹤健. 不同水土流失治理模式下的土壤理化特征[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2006,22(4):5-9.
- [13] 莫江明. 鼎湖山退化马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤全磷和有效磷的比较[J]. 广西植物,2005,25(2):186-192.
- [14] von Oheimb G, Power S, Talk K, et al. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in calluna-dominated heathlands[J]. Ecosystems, 2010,13(2):317-327
- [15] 黄绍文,金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料,1995(5):23-29.
- [16] 邓小华,杨丽丽,周米良,等. 湘西喀斯特区植烟土壤速效钾含量分布及影响因素[J]. 山地学报,2013,31(5):519-526.
- [17] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志,2014,33(10):2610-2617.
- [18] 秦娟,唐心红,杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(4):598-604.
- [19] 杨平平,徐仁扣,黎星辉. 淋溶条件下马尾松针对土壤的酸化作用[J]. 生态环境学报,2012,21(11):1817-1821.

(上接第33页)

- [19] 安佑志,张远,高炜,等. 基于 GIMMS NDVI 数据的北方13省荒漠化趋势评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014,28(4):1-7.
- [20] 房世波,谭凯炎,刘建栋,等. 鄂尔多斯植被盖度分布与环境因素的关系[J]. 植物生态学报,2009,3(1):25-33.
- [21] 李晓光,刘华民,王立新,等. 鄂尔多斯高原植被覆盖变化及其与气候和人类活动的关系[J]. 中国农业气象, 2014,35(4):470-476.
- [22] 丁一汇,林而达,何建坤. 中国气候变化:科学,影响,适应及对策研究[M]. 北京:中国环境科学出版,2009.
- [23] 秦大河,陈振林,罗勇,等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展,2007,3(2):63-73.
- [24] 李晓兵,王瑛,李克让. NDVI 对降水季节性和年际变化的敏感性[J]. 地理学报,2000,55(S1):82-89.