

不同垦复时间毛竹林 土壤性质变化特征研究

刘广路¹, 范少辉^{1*}, 漆良华¹, 杜满义¹, 肖复明²

(1. 国际竹藤网络中心, 竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102; 2. 江西省林业科学院, 江西 南昌 330032)

摘要: 应用典型样地调查及实验室分析相结合的方法, 以江西省安福县不同垦复时间的毛竹林为研究对象, 对未垦复、垦复 3 年、垦复 10 年的毛竹林土壤理化性质特征进行研究, 并应用土壤综合指数 (IFI) 法对不同垦复时间毛竹林土壤综合肥力进行了评价。结果表明: 垦复可以改善毛竹林地土壤物理性质, 尤其是表土层土壤的物理性质。垦复极显著的降低了 0~20 cm 土壤容重, 提高了土壤非毛管孔隙度。垦复降低了土壤的活性酸度, 可以减缓土壤养分元素的流失; 提高了有机质、全氮、全磷、有效氮、速效磷的含量, 增加了土壤养分供给能力, 为毛竹林的立地生产力维持提供了重要保障。不同垦复时间毛竹林土壤肥力综合评价指数的排列大小顺序为垦复 10 年 0.463 5、垦复 5 年 0.418 4、未垦复毛竹林地土壤 0.354 8, 垦复对土壤具有明显的改良效果。

关键词: 毛竹林; 土壤理化性质; 垦复时间; 土壤综合得分

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2011)01-0068-08

Soil Properties of Different *Phyllostachys pubescens* Forests with Soil Reclamation

LIU Guang-lu¹, FAN Shao-hui^{1*}, QI Liang-hua¹, DU Man-yi¹, XIAO Fu-ming²

(1. International Centre for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China; 2. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China)

Abstract: The soil properties of *Phyllostachys pubescens* forests with different time of soil reclamation were studied by method of typical field survey combined with laboratory analysis in Anfu County, Jiangxi Province. The comprehensive properties of soil were evaluated by method of IFI. The results showed that reclamation improved the soil physical properties, especially the physical properties of the surface layer. The bulk density of 0-20 cm soil layer decreased significantly, and the non-capillary porosity increased significantly. The value of pH increased with reclamation time, and the content of organic matters, total nitrogen, total phosphors, available nitrogen, available phosphors were increased by the soil reclamation. Soil reclamation in bamboo forest may be a better measure to maintain the productivity of bamboo forest. The comprehensive evaluation scores of soil increased with the reclamation time. The IFI of soil was 0.463 5 in the forest with 10 years' reclamation, was 0.418 3 in the forest with 5 years' reclamation, and was 0.354 8 in the forest without reclamation. The measure of reclamation can improve the properties.

收稿日期: 2010-05-26 修回日期: 2010-12-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑(2006BAD19B0104、2006BAD19B0302) 和国际竹藤网络中心重点业务专项(1632010005)

作者简介: 刘广路(1975—), 男, 博士, 主要从事竹林培育和竹林生态方面的研究, E-mail: liuguanglu@icbr.ac.cn;

* 通讯作者: 范少辉, 研究员, 博士, 博士生导师, 首席专家, E-mail: fansh@icbr.ac.cn。

Key words: *Phyllostachys pubescens* forest; soil properties; time of soil reclamation; comprehensive evaluation scores

江西是我国毛竹(*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. de Lehaie)的主要产区之一,竹林面积近70万 hm^2 ,占全国毛竹林面积的20%以上。近年来,随着市场对竹材和竹林副产品需求的增加,竹林效益得到了显著的提高。竹林在解决农民增收、农业增长、农村稳定方面发挥了重要的作用。为了获得更高的经济效益,毛竹林集约化经营水平逐渐提高,但是长期集约经营、连年采伐方式、频繁的营林活动(采伐、施肥和垦复等)、大量施用化肥、传统的整株采伐利用作业习惯可能对毛竹林长期立地生产力产生不利的影响^[1-3],片面追求经济效益,而忽视竹林生态系统其固有的结构及生态功能,使我国毛竹林立地生产力呈现衰退趋势^[4],如何保持毛竹林的长期生产力已成为一个亟待解决的科学问题。笔者所在课题组对我国主要毛竹产地不同混交类型、不同管护模式和不同经营时间毛竹林的生长情况进行了调查,对毛竹林的退化情况、退化机理和保持技术进行了研究。不同栽培类型毛竹林生物多样性^[5]、土壤环境特征^[6-10]、生物循环特征^[11]、水文功能^[12-13]等已报道。对不同管护模式和经营时间的毛竹林系统特性正在进行整理中,其中不同管护模式土壤特性^[14-15]、不同劈草时间毛竹土壤渗透性^[16]和生产力变化^[17]等做了报道。本文主要探索不同垦复时间的毛竹林土壤特征变化规律,以期揭示较长时间连续垦复对土壤肥力的影响。垦复作业因其可显著地提高毛竹林生产力,在我国毛竹产区得到了较大面积的推广和应用^[18],通过深翻土壤,改良深层土层结构可显著的提高毛竹林生产力^[19-21],对一些病虫害也有防治作用^[22-24]。当前关于垦复的研究主要集中在垦复技术^[25-26]和垦复效果^[27]的研究上,且通常都集中在一个较短的时间段内。垦复在增加土壤团聚体和水稳定性团聚体含量,降低土壤结构破坏率,具有较大的涵养水源作用^[27]的同时,也增加了引起水土冲刷和养分流失^[28-29]的风险,探索长时间垦复对土壤理化性质的影响是一个十分重要的科学问题。本文以我国毛竹之乡“江西省安福县”不同垦复时间的毛竹林为研究对象,对其在垦复时间梯度上土壤理化和生物学特征进行了研究,以期能够揭示长期垦复对土壤肥力的影响,为毛竹林生态经营、长期生产力保持提供科学依据。

1 研究区概况

实验地设置在江西省安福县金顶林场,东经 114° 至 $114^\circ47'$ 、北纬 $27^\circ4'$ 至 $27^\circ36'$ 。亚热带季风湿润气候,年平均气温 17.7°C 。最热月为7—8月,平均气温 28.9°C ,最冷月为1月,平均气温 5.9°C 。极端最高、最低气温分别为 39.7°C 和 -8.3°C 。年均降水量 1553mm ,年均降水日 166d 。降水明显集中在春季和初夏。年均日照时数 1649h ,山区日照偏少。年无霜期 279d ,最长 323d ,最短 247d 。土壤为山地红黄壤,母岩为花岗岩,团粒状结构,质地较疏松。森林覆盖率 98.2% ,主要树种为杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lanb. (*P. sinensis* Lamb.))、黄山松(*Pinus taiwanensis* Hayata)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelman)、樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)、毛竹等。

2 研究方法

2.1 样地设置

2008年9月在研究区一个小流域内的同一坡面上,选择无经营林地(I)、2005年开始垦复毛竹林(II)、1998年开始垦复毛竹林(III)样地,每种类型设置样地4块。第1次垦复完成后,每年进行劈草作业,每年垦复林地的 $1/5$,每5年整块林地垦复1次,垦复深度为 $20\sim30\text{cm}$ 。样地规格为 $20\text{m}\times20\text{m}$ 。对样地进行调查,记录毛竹的胸径、树高、经营历史以及样地土壤剖面情况等,样地土壤为山地红黄壤,母岩为花岗岩,团粒状结构,质地较疏松,土层厚度 $65\sim75\text{cm}$,腐殖质厚度 $4\sim5\text{cm}$ 。

2.2 样品采集

在每一标准地沿对角线布点,用环刀按 5cm 一层在 $0\sim60\text{cm}$ 分层取样,测定土壤容重、孔隙度及持水性能的测定。由于样地剖面情况基本一致,所以每个样地取 $0\sim20\text{cm}$ 、 $20\sim40\text{cm}$ 和 $40\sim60\text{cm}$ 样品各5个,带回实验室风干过筛,按质量相等的原则制备成混合样品,测定土壤化学性质及土壤酶活性。

2.3 样品分析

土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量等物理性质的测定采用环刀法(LY/T 1215 - 1999)。

土壤 pH 值(水浸提—酸度计法 LY/T 1239 - 1999) ; 土壤有机质(重铬酸钾氧化—外加热法 LY/T 1237 - 1999) , 全氮(硫酸—混合加速剂消煮—扩散法 LY/T 1228 - 1999) , 全磷(氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法 LY/T 1232 - 1999) 。全钾(氢氧化钠熔融—火焰光度计法 LY/T 1234 - 1999) , 水解氮(碱解扩散法 LY/T 1229 - 1999) , 有效磷(NH₄F - HCl 浸提—钼锑抗比色法 LY/T 1233 - 1999) , 速效钾(CH₃COONH₄ 浸提—火焰光度法 LY/T 1236 - 1999) 。(测定方法为中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》中所规定的方法。)

2.4 土壤性质综合评价方法

2.4.1 土壤因子隶属度值与权重、负荷量的计算 土壤性质是土壤物理性质、土壤化学性质、土壤酶活性和土壤微生物等指标的综合反映。本研究根据各单项肥力指标的代表性和对植被影响的主导性, 选择 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土壤各肥力因子的数据, 建立不同竹林土壤性质综合评价指标体系。

由于土壤性质因子变化具有连续性质, 故各评价指标采用连续性质的隶属度函数, 并从主成分因子负荷量值的正负性, 确定隶属度函数分布的升降性, 这与各因子对植被的效应相符合。以往研究普遍采用专家打分来确定各单项土壤性质指标的权重系数。为避免人为影响, 本文运用 SPSS 软件对各处理土壤性质因子的隶属度值进行因子分析, 通过计算公因子方差确定权重系数。

2.4.2 土壤综合指数(IFI) 根据模糊数学中的加乘法原则, 求得土壤综合评价指标 IFI。

$$IFI = \sum W_i \times F(X_i) \tag{1}$$

(1) 式中 W_i ——各土壤因子的权重向量; $F(X_i)$ ——各土壤因子的隶属度值。

2.5 数据处理与分析

数据处理使用 SPSS13.0 统计分析软件和 Excel 2003 中的相关程序。

3 结果与分析

3.1 土壤物理性质

3.1.1 土壤容重 3 种林分土壤容重的排列顺序为 II、III、I, 分别为(1 177.44 ± 80.78) kg/m³、(1 157.66 ± 118.17) kg/m³ 和(1 145.00 ± 119.64) kg/m³, 但差异未达到显著水平, 反映了垦复作业可以较好地维持竹林土壤容重在合理的水平。

0 ~ 20 cm 土层深度土壤容重的排列顺序为林分 I、II、III; 20 ~ 40 cm 土层土壤容重的排列顺序为 II、III、I; 40 ~ 60 cm 土层土壤容重的排列顺序为 III、II、I, 0 ~ 20 cm 土层范围内, 垦复毛竹林土壤容重显著下降, 20 ~ 60 cm 土层容重呈上升趋势。垦复作业后毛竹林生产力提高, 伐竹和挖笋量增大, 对土壤的践踏强度增高, 土壤容重增大; 垦复作业的深度通常为 20 cm, 0 ~ 20 cm 土层扰动频繁, 容重呈下降的趋势, 这可能是垦复竹林 0 ~ 20 cm 土层容重较小, 而 20 ~ 40 cm 土层容重较高的原因。

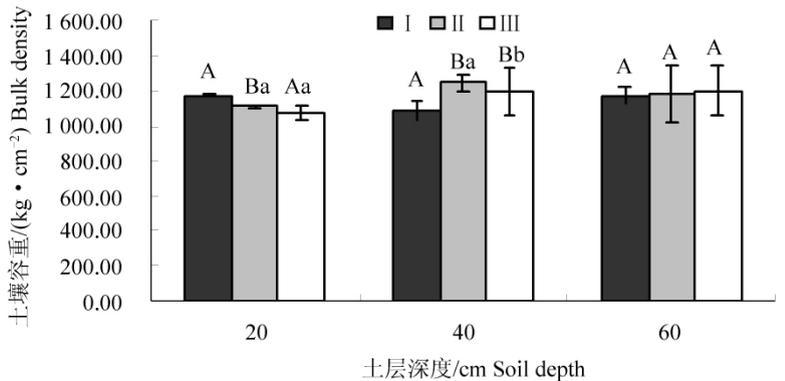


图 1 垦复毛竹林土壤容重变化

Fig. 1 The soil bulk density of bamboo forest with soil reclamation

垦复作业的深度通常为 20 cm, 0 ~ 20 cm 土层扰动频繁, 容重呈下降的趋势, 这可能是垦复竹林 0 ~ 20 cm 土层容重较小, 而 20 ~ 40 cm 土层容重较高的原因。

3.1.2 土壤孔隙及持水能力特征 垦复时间不同, 土壤的孔隙状况也不同, 土壤非毛管孔隙的排列顺序为 III、II、I, 其中垦复 5 年和 10 年的毛竹林土壤非毛管孔隙度与未垦复竹林土壤达到显著或极显著水平(表 1), 可见垦复可以提高土壤的非毛管孔隙度, 且随着垦复时间的延长呈增加趋势。3 种垦复时间毛竹林土壤非毛管孔隙度均以 0 ~ 20 cm 最低, 20 ~ 40 cm 最高, 可能反映了毛竹林有别于其它人工

林的生长及作业特点,毛竹林每年采笋、挖竹,频繁的践踏破坏了表层土壤的非毛管孔隙度;而 20 ~ 40 cm 土层受践踏的影响较小,非毛管孔隙度反而高于 0 ~ 20 cm 土层。毛管孔隙度的排列顺序与非毛管孔隙度排列顺序相反,为 I、II、III,垦复有增加土壤毛管孔隙度的作用。毛管持水量由毛管孔隙度推算所得,非毛管孔隙度与最大持水量和毛管持水量的差密切相关,因而土壤持水能力的变化与土壤孔隙度变化趋势相同。

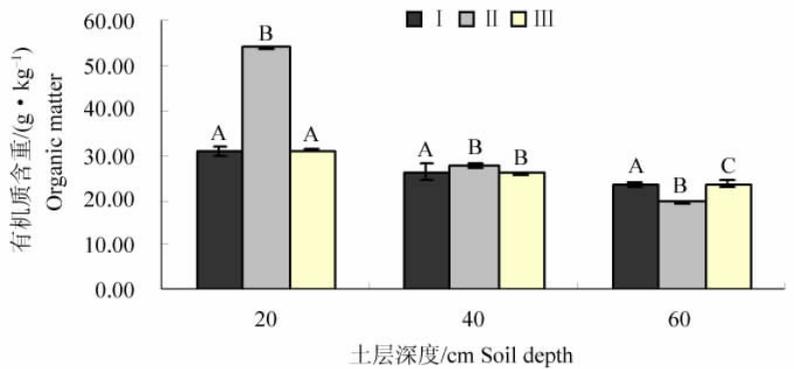
表 1 垦复毛竹林土壤孔隙和持水特征

Tab. 1 The characteristics of porosity and water - holding capacity in bamboo forest with soil reclamation

林分类型 Forest type	土层深度/cm Soil depth	非毛管孔隙/% Non - capillary porosity	毛管孔隙/% Capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity	最大持水量/mm Maximum water capacity	毛管持水量/mm Capillary water capacity	最小持水量/mm Minimum water capacity
I	20	7.77 ± 1.66	45.60 ± 3.23	53.37 ± 3.60	106.73 ± 7.21	91.20 ± 6.45	90.27 ± 6.51
	40	11.70 ± 2.04	44.87 ± 5.02	56.57 ± 5.38	113.13 ± 10.76	89.73 ± 10.04	89.00 ± 9.91
	60	8.40 ± 0.40	42.03 ± 2.31	50.43 ± 2.63	100.87 ± 5.26	84.07 ± 4.63	82.27 ± 4.14
	平均 Average	9.29 ± 1.37Aa	44.17 ± 3.52a	53.46 ± 3.87a	106.91 ± 7.74a	88.33 ± 7.04a	87.18 ± 6.85A
II	20	8.80 ± 1.46	43.80 ± 1.85	52.60 ± 1.16	105.20 ± 2.32	87.60 ± 3.70	82.27 ± 0.84
	40	14.50 ± 1.82	35.20 ± 1.40	49.70 ± 2.48	99.40 ± 4.96	70.40 ± 2.81	67.87 ± 2.08
	60	12.87 ± 2.78	39.03 ± 0.47	51.90 ± 2.70	103.80 ± 5.39	78.07 ± 0.93	76.40 ± 0.70
	平均 Average	12.06 ± 2.02Ab	39.34 ± 1.24b	51.40 ± 2.11a	102.80 ± 4.22a	78.69 ± 2.48a	75.51 ± 1.21B
III	20	14.47 ± 0.59	41.43 ± 0.94	55.90 ± 1.53	111.80 ± 3.06	82.87 ± 1.88	79.47 ± 3.13
	40	15.30 ± 2.99	37.53 ± 1.19	52.83 ± 4.10	105.67 ± 8.19	75.07 ± 2.37	70.13 ± 0.41
	60	11.80 ± 5.55	38.10 ± 1.01	49.90 ± 6.51	99.80 ± 13.03	76.20 ± 2.02	74.60 ± 2.48
	平均 Average	13.86 ± 3.04ABb	39.02 ± 1.05b	52.88 ± 4.05a	105.76 ± 8.09a	78.05 ± 2.09a	74.43 ± 2.01B

3.2 土壤肥力特征分析

3.2.1 有机质 垦复对土壤有机质含量有重要影响,60 cm 土层有机质平均含量的排列顺序为 II、I、III,分别为 33.56、26.79、25.17 g/kg(图 2),其中毛竹林 II 土壤有机质含量极显著高于毛竹林 I,其后随着垦复时间的延长,土壤有机质呈下降的趋势,毛竹林 I 与 III 土壤有机质含量的差异未达到显著水平。垦复作业 3 年后,0 ~ 20 cm 土层有机质含量极显著高于未垦复毛竹林和垦复 10 年毛竹林,原因是初次垦复作业时大量的杂草灌丛被翻入土壤中,增加了土壤有机质含量。40 ~ 60 cm 土层有机质含量随着垦复时间的延长而降低,反映了垦复对土壤有机质的影响主要发生在 0 ~ 40 cm 土层范围内,而深层土壤有机质随着垦复毛竹林生产力的增加而更快的被消耗。



图中字母相同表示差异不显著,其中大写字母 $P < 0.01$,小写字母为 $P < 0.05$ 。

The value sharing the same letters are no significance ($P \geq 0.05$), the different letters are significant ($P < 0.05$), and the different capital letters are great significant ($P < 0.01$).

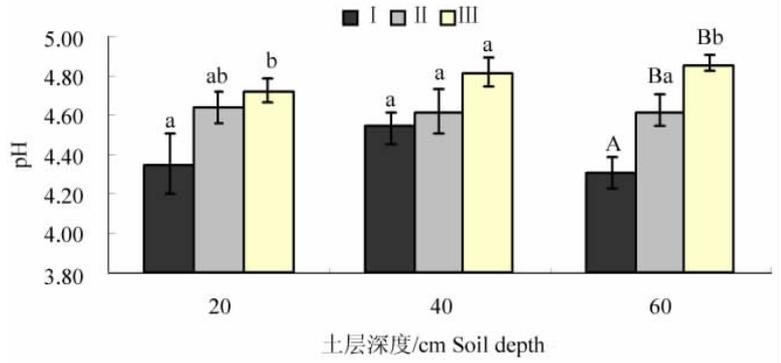
图 2 垦复毛竹林土壤有机质的变化

Fig. 2 The organic matter of bamboo soil with soil reclamation

3.2.2 土壤酸度 3 种林分

60 cm 土层范围内 pH 值的排列顺序为 III > II > I,分别为 4.80、4.63、4.40, pH 值随着垦复时间的延长呈上升趋势,但其数值差异较小。土壤 pH 值与林木生长、土壤性质变化、土壤有机质的分解、土壤营养元素的释放与转化以及土壤发生过程中元素的迁移等有关,土壤 pH 值更高有利于毛竹林生长。在不同土层深度毛竹林土壤 pH 值均随着垦复时间的延长呈增加趋势,但增加幅度并不一致,0 ~ 20 cm 土层内,垦复毛竹林土壤 pH 值显著高于未垦复毛竹林;20 ~ 40 cm 层未达到显著水平;40 ~ 60 cm 层达到极显著水平。

3.2.3 垦复时间梯度上的土壤主要养分特性 垦复作业毛竹林全氮、全磷、全钾含量高于未垦复林地,其中林分II和III全氮和全磷含量与林分I的差异达到极显著水平;水解氮与有效磷的变化规律与全氮和全磷变化规律相似,其中水解氮含量显著高于未垦复毛竹林,但是速效钾含量随着垦复时间的延长呈极显著下降的趋势(表2)。可见,垦复作业可以明显提高林地氮素和磷素的供应能力,是毛竹林维持较高生产力的保障。钾元素在植物体内对碳水化合物的转化与运输起重大作用,土壤中钾元素持续下降可能会影响毛竹贮藏物质和经济产量。未垦复毛竹林主要全量和速效养分随着土层深度的增加呈下降趋势,而垦复毛竹林全钾、全磷含量呈升高的趋势,造成这种现象的原因和垦复的作业习惯密切相关,垦复后土壤有机质增多,毛竹林生产力提高,对土壤养分吸收能力增强,土壤养分消耗增多,因毛竹根系主要分布在0~40 cm土层范围内,且80%以上根系集中在0~20 cm土层范围内,可能造成垦复竹林表层土壤全钾、全磷含量低于毛竹林深层土壤养分元素含量。



图中字母相同表示差异不显著,其中大写字母 $P < 0.01$,小写字母为 $P < 0.05$ 。

The value sharing the same letters are no significance ($P \geq 0.05$), the different letters are significant ($P < 0.05$), and the different capital letters are great significant ($P < 0.01$).

图3 垦复毛竹林土壤pH值变化

Fig.3 The pH value of bamboo soil with soil reclamation

表2 垦复时间梯度上的土壤主要养分元素特征

Tab.2 The characteristics of main nutrients in bamboo forest with soil reclamation

林分类型 Forest type	土层深度/cm Soil depth	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	全磷/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassim	水解氮/(g·kg ⁻¹) Hydrolyzable nitrogen	有效磷/(g·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(g·kg ⁻¹) Available potassium
I	20	1.39 ± 0.01 Aa	0.13 ± 0.00 A	28.21 ± 0.26 A	111.27 ± 3.21 Aa	2.74 ± 0.06 Aa	39.97 ± 1.14 A
II		2.18 ± 0.16 B	0.13 ± 0.00 A	13.51 ± 0.73 B	157.66 ± 3.71 B	4.11 ± 0.00 B	52.54 ± 1.14 B
III		1.74 ± 0.02 ABa	0.18 ± 0.00 B	16.19 ± 0.35 B	98.06 ± 6.67 A	2.05 ± 0.19 Ab	42.16 ± 2.28 A
I	40	0.57 ± 0.01 A	0.14 ± 0.00 Aa	21.65 ± 0.32 A	29.64 ± 3.71 A	1.99 ± 0.16 A	27.38 ± 0.00 A
II		0.92 ± 0.01 B	0.13 ± 0.00 Ab	26.97 ± 0.33 B	109.35 ± 6.68 B	2.37 ± 0.25 A	44.52 ± 0.00 Ba
III		1.00 ± 0.04 B	0.20 ± 0.00 B	30.38 ± 0.82 C	62.81 ± 1.85 C	2.17 ± 0.22 A	20.48 ± 1.97 B
I	60	0.50 ± 0.04 A	0.13 ± 0.00 A	21.28 ± 0.43 A	16.69 ± 0.00 A	0.56 ± 0.00 A	18.49 ± 1.14 A
II		0.71 ± 0.02 B	0.35 ± 0.00 B	29.38 ± 0.35 B	40.77 ± 1.85 B	1.56 ± 0.12B	18.26 ± 1.14 B
III		0.80 ± 0.02 B	0.42 ± 0.01 C	25.91 ± 0.83 C	61.39 ± 6.44 B	2.06 ± 0.00C	29.79 ± 1.15 C
I	平均 Average	0.82 ± 0.02A	0.13 ± 0.00A	23.71 ± 0.34 A	52.53 ± 2.31Aa	1.76 ± 0.08A	28.61 ± 0.76A
II		1.27 ± 0.07B	0.23 ± 0.00B	23.29 ± 0.66A	102.59 ± 4.70B	2.68 ± 0.08B	32.97 ± 0.38B
III		1.18 ± 0.02B	0.27 ± 0.00B	24.16 ± 0.51A	74.08 ± 3.46Ab	2.09 ± 0.18A	24.81 ± 1.80B

表中数据位平均值 ± 标准差;字母相同表示差异不显著,其中大写字母 $P < 0.01$,小写字母为 $P < 0.05$ 。

The value in the table are the mean values ± standard deviation, the value sharing the same letters are no significance ($P \geq 0.05$), the different letters are significant ($P < 0.05$), and the different capital letters are great significant ($P < 0.01$).

3.3 土壤肥力综合定量评价

3.3.1 土壤指标隶属度的计算 利用 SPSS 统计软件运用因子分析法对各林分0~60 cm 土层土壤性质指标(平均值)进行分析,先对数据进行处理转化,处理方法为:对于与土壤性质成负效应的因子采用公式: $F(X_i) = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$;而对与土壤性质成正效应的因子采用公式: $F(X_i) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$;式中: $F(X_i)$ —转化后肥力因子的隶属度值; X_{ij} —各肥力因子平均值; $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ —第 i 项肥力因子中的最大值和最小值。设土壤容重为 X_1 ,最大持水量为 X_2 ,毛管持水量为 X_3 ,最小持水量为 X_4 ,非毛管孔隙度为 X_5 ,毛管孔隙度为 X_6 ,有机质为 X_7 ,水解氮为 X_8 ,有效磷为 X_9 ,速效钾为 X_{10} ,全氮为 X_{11} ,全磷为 X_{12} ,全钾为 X_{13} ,pH 值为 X_{14} ,各土壤指标隶属度值见表3。

表 3 不同垦复时间毛竹林地土壤指标隶属度

Tab. 3 The membership degree of the soil physical and chemical properties factor in bamboo forest with soil reclamation

林分类型 Forest type	土层深度/cm Soil depth	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
I	20	0.76	0.55	0.35	0.42	0.66	0.35	0.39	0.53	0.33	0.52	0.19	0.26	0.92	0.10
II	20	0.66	0.49	0.55	0.45	0.35	0.55	0.99	0.96	0.77	0.93	0.77	0.01	0.08	0.85
III	20	0.76	0.76	0.36	0.32	0.89	0.36	0.28	0.40	0.12	0.59	0.45	0.41	0.24	0.00
I	40	0.36	0.17	0.33	0.30	0.15	0.33	0.03	0.07	0.14	0.30	0.01	0.11	0.60	1.00
II	40	0.31	0.16	0.13	0.08	0.50	0.13	0.94	0.87	0.31	0.80	0.70	0.04	0.03	0.62
III	40	0.39	0.33	0.23	0.13	0.56	0.23	0.49	0.41	0.22	0.10	0.86	0.35	0.94	0.87
I	60	0.53	0.55	0.46	0.38	0.33	0.46	0.04	0.00	0.00	0.99	0.19	0.00	0.43	0.00
II	60	0.48	0.49	0.13	0.33	0.44	0.13	0.64	0.63	0.25	0.07	0.18	0.23	0.06	0.29
III	60	0.44	0.40	0.08	0.24	0.38	0.08	0.40	0.43	0.66	0.01	0.71	0.76	0.95	1.00

3.3.2 土壤指权重的计算 由于土壤性质因子变化具有连续性质,故各评价指标采用连续性质的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合。运用 SPSS 软件对各处理土壤性质因子的隶属度值进行因子分析,通过计算公因子方差确定权重系数。通过计算得土壤各健康指标的公因子方差,其值表示对土壤性质总体变异的贡献,据此确定各指标权重值(表 4)。

表 4 正交旋转后公因子载荷矩阵及土壤指标权重

Tab. 4 The common factor loading matrix after orthogonal rotation and the weight of index of soil properties

土壤性质 Soil properties	0~20 cm				20~40 cm				40~60 cm					
	1	2	3	权重 Weight	1	2	3	4	权重 Weight	1	2	3	4	权重 Weight
X_1	0.22	-0.57	0.69	0.09	0.76	0.00	0.04	0.61	0.05	0.00	0.10	0.27	0.92	0.05
X_2	-0.04	-0.42	0.90	0.11	0.81	0.15	-0.04	0.55	0.05	-0.14	0.02	0.30	0.94	0.07
X_3	-0.07	0.45	0.87	0.05	0.97	0.13	-0.09	-0.06	0.09	-0.06	-0.11	0.95	0.10	0.08
X_4	-0.30	0.40	0.80	0.07	0.94	0.19	-0.04	-0.23	0.09	0.04	0.60	0.54	0.32	0.02
X_5	0.04	-0.96	-0.03	0.07	-0.10	0.05	0.06	0.97	0.08	-0.13	-0.08	-0.25	0.94	0.10
X_6	-0.07	0.45	0.87	0.05	0.97	0.13	-0.09	-0.06	0.09	-0.06	-0.11	0.95	0.10	0.08
X_7	0.97	0.14	-0.03	0.07	-0.10	0.73	0.60	0.22	0.05	0.23	0.95	-0.09	-0.03	0.07
X_8	0.89	0.24	-0.16	0.07	-0.20	0.58	0.70	0.26	0.06	0.21	0.95	-0.15	0.01	0.08
X_9	0.00	0.93	0.21	0.06	0.43	0.81	0.09	-0.10	0.06	0.76	0.61	-0.08	-0.04	0.06
X_{10}	0.95	-0.23	0.01	0.09	0.30	0.54	0.73	-0.09	0.05	-0.37	-0.63	0.56	0.00	0.09
X_{11}	0.90	0.05	-0.15	0.07	-0.17	0.87	-0.01	0.35	0.08	0.86	0.41	0.11	-0.16	0.06
X_{12}	-0.91	0.27	0.09	0.09	0.49	0.80	-0.27	-0.15	0.09	0.82	0.54	-0.14	-0.08	0.07
X_{13}	-0.81	0.13	-0.10	0.06	0.21	0.20	-0.96	0.01	0.11	0.96	-0.14	0.04	-0.11	0.09
X_{14}	0.00	0.92	0.12	0.06	-0.41	-0.85	-0.28	0.10	0.05	0.85	0.24	-0.39	0.00	0.09

3.3.3 土壤肥力综合指标 3 种林分土壤肥力综合指标的排列顺序为 III、II、I,随着垦复时间的进行,土壤性质综合得分呈上升趋势(表 5)。垦复作业将大量的杂草灌木被翻入土壤中,为土壤提供了大量的碳源。土壤有机碳的分解可以为林分提供大量的养分,垦复毛竹林土壤中较高的全量元素和速效元素含量也证明了此点。在 0~20 cm 土层范围内,土壤性质综合得分的排列顺序为 II、III、I,20~60 cm 的排列顺序为 III、II、I,反映了垦复作业对不同层次土壤的影响程度不一致,在 0~20 cm 土层范围内,垦复 3 年毛竹林地土壤综合得分最高,而在 20~60 cm 土层范围内均为垦复 10 年毛竹林最高。未垦复毛竹林较垦复过的毛竹林下植被更丰富,垦复后大量有机物被翻入土壤中,因为土壤垦复深度通常为 20 cm 左右,因而垦复 3 年毛竹林表层土壤的综合得分最高。

4 结论与讨论

(1) 垦复对土壤性质具有明显的改良效果,随着垦复作业的进行,土壤性质综合得分呈上升趋势,分别为 0.354 8、0.411 7、0.463 5。与其它经营措施相比,如对长期纯林化经营竹林生产力呈先上升后下降的趋势,毛竹林土壤肥力的主要指标呈下降趋势,土壤密度增加^[30],土壤总有机碳、水溶性有机碳

和微生物量碳明显减少^[31-32];长期劈草毛竹林虽然生产力有明显地提高,但其土壤综合性质随着劈草时间的延长而降低^[17],因此毛竹林垦复作业在改善土壤性质方面具有明显的效果,垦复与其它经营手段进行组合、轮替以及同一经营措施的间隔应用,可能是维持毛竹林生产行之有效的方法。

表5 土壤肥力综合指标值(SH)

Tab.5 Comprehensive evaluation of soil property (SH)

林分类型 Forest type	土壤性质得分 The scores of comprehensive evaluation of soil property			平均得分 Average scores of comprehensive evaluation of soil property
	0~20	20~40	40~60	
I	0.463 3	0.284 8	0.316 2	0.354 8
II	0.591 1	0.340 3	0.323 7	0.418 4
III	0.463 7	0.450 0	0.476 8	0.463 5

(2) 垦复作业可以显著地改善土壤物理性质。虽然不同垦复时间毛竹林地土壤容重差异未达到显著水平,但垦复作业可以显著提高竹林地土壤非毛管孔隙度。孔隙特征是土壤结构的重要指标,其大小、数量、连续性及其不同分配格局显著影响土壤中水、热、气运动和植物根系的生长^[33-36]。植物根系生长对土壤孔隙特征也有重要的影响,毛竹根鞭系统主要分布在0~20 cm土层范围内,20~60 cm土层分布较少,垦复后鞭根生长更迅速,竹鞭的伸长和细根的周转增加了土壤孔隙,改善了土壤的结构。通常情况下,土壤容重与土壤孔隙特征密切相关^[33,36-37],但是本文所调查毛竹林土壤容重并未随着土壤非毛管孔隙度的降低而降低,可能是因为毛竹林地垦复后,竹林的笋、材产量提高,采收过程中对土壤的践踏强度增大,同时垦复后地表植被减少,对土壤的保护作用下降,因而土壤容重并未随着垦复时间的延长呈明显的降低趋势。

(3) 垦复作业增加了土壤有机质的含量,但其增幅随着垦复时间的延长而降低。随着垦复时间的延长,土壤有机质呈先上升后下降的趋势。毛竹林进行垦复作业后,较多的枯枝杂草被带入土壤,土壤有机质含量上升。有机质是毛竹生长的重要能量来源、营养源^[35],其通过对土壤性质的改变影响土壤生产力,文中垦复作业提高了全氮、全磷、有效氮、速效磷的含量,进一步证实了有机质的作用。氮素、磷素是植物生长发育必需的大量营养元素,在植物生命活动中具有不可替代的作用^[38],并与生态系统中碳、水、磷、硫等营养元素间存在明显的耦合作用^[39],因而氮素、磷素的提高对毛竹林的生长十分有利。研究表明有效钾的增多可以抑制土壤中无机氮的有效性^[40],这可能是毛竹林地钾含量与氮含量随垦复时间变化趋势不同的原因。

(4) pH值随着垦复时间的延长呈上升趋势,土壤pH值在土壤物质交换、植物营养及水分供应等方面起着重要作用,它对植物生长、微生物活动、养分的存在状态及土壤理化性质等有很大影响。土壤酸化将加速元素的淋失,使土壤贫瘠化^[41],pH值升高可能为毛竹林生长提供更为有利的生长环境。

参考文献:

- [1]楼一平,盛炜彤.我国毛竹林长期立地生产力研究问题的评述[J].林业科学研究,1999,12(2):172-178.
- [2]楼一平.毛竹林长期立地生产力评价和预测研究的评述[J].竹子研究汇刊,1998(4):31-35.
- [3]楼一平,吴良如.毛竹纯林长期经营对林地土壤肥力的影响[J].林业科学研究,1997,10(2):125-129.
- [4]陈双林,萧江华,薛建辉.竹林水文生态效应研究综述[J].林业科学研究,2004,17(3):399-404.
- [5]Zhang Changshun, Xie Gaodi, Fan Shaohui, et al. Variation in vegetation structure and soil properties and the relation between understory plants and environmental variables under different *Phyllostachys pubescens* forests in southeastern China[J]. Environmental Management, 2010, 45(4):779-792.
- [6]刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-47.
- [7]肖复明,范少辉,汪思龙,等.毛竹林土壤有机碳及微生物量碳特征研究[J].水土保持学报,2008,22(6):128-131.
- [8]张昌顺,范少辉,谢高地.闽北典型毛竹(*Phyllostachys edulis*)林土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J].自然资源学报,2010,25(2):236-248.
- [9]张昌顺,范少辉,漆良华,等.闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特征研究[J].水土保持学报,2008,22(6):170-175.

- [10]刘广路,范少辉,官凤英,等. 闽西北不同类型集约经营毛竹林土壤环境特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2010, 34(5): 17-22.
- [11]刘广路,范少辉,漆良华,等. 闽西北不同类型毛竹林养分分布及生物循环特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2155-2161.
- [12]张昌顺,范少辉,官凤英,等. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J]. 林业科学, 2009, 45(1): 36-42.
- [13]张昌顺,范少辉,谢高地. 闽北毛竹林枯落物层持水功能研究[J]. 林业科学研究, 2010, 23(2): 259-265.
- [14]范少辉,刘广路,官凤英,等. 不同管护类型毛竹林土壤渗透性能的研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4): 568-573.
- [15]刘广路,范少辉,苏文会,等. 不同管护模式毛竹林碳氮分布特征及其耦合关系[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 218-222.
- [16]范少辉,刘广路,漆良华,等. 闽西北不同经营时间毛竹林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报, 2010, 23(1): 24-27.
- [17]刘广路,范少辉,官凤英,等. 不同劈草时间毛竹林生产力及土壤变化特征[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 704-711.
- [18]董晨玲. 毛竹扩鞭成林新竹生长效果研究[J]. 竹子研究汇刊, 2003(4): 30-33.
- [19]董建文,张兴正. 不同土壤管理措施的毛竹扩鞭效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(1): 37-40.
- [20]郭晓敏,陈广生,牛德奎,等. 平衡施肥对毛竹笋产量的影响效应研究[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(1): 48-53.
- [21]丁魏发. 毛竹垦复技术初步研究[J]. 现代农业科技, 2006, 11: 23-24.
- [22]王明旭,戴良英,陈良昌. 毛竹枯梢病病原菌致病机制及防治技术[J]. 森林病虫害通讯, 2000, 19(5): 8-10.
- [23]刘巧云,陈国顺,陈伟,等. 毛竹林经营管理与螨类危害关系的调查[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(2): 33-35.
- [24]张飞萍,陈清林,尤民生,等. 毛竹林经营干扰、林下植物与冠层螨类之间的关系[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 143-150.
- [25]陈双林,杨清平. 散生类竹子地下鞭系生长影响因子研究综述[J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 473-478.
- [26]陶芳明,李昌栋. 不同垦复时间和深度在毛竹林生长发育中的作用[J]. 竹子研究汇刊, 1994, 13(2): 61-65.
- [27]陈乾富. 毛竹林不同经营措施对林地土壤肥力的影响[J]. 竹子研究汇刊, 1999, 18(3): 19-24.
- [28]高清贵. 浅谈毛竹山的水土保持[J]. 亚热带水土保持, 2006, 18(2): 39-40.
- [29]吴志勇,王云珠. 安吉竹业发展现状和思路[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 76-79, 83.
- [30]楼一平,吴良如,邵大方,等. 毛竹纯林长期经营对林地土壤肥力的影响[J]. 林业科学研究, 1997, 10(2): 125-129.
- [31]周国模,徐建明,吴家森,姜培坤. 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变[J]. 林业科学, 2006, 42(6): 124-128.
- [32]徐秋芳,徐建明,姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 15-17, 21.
- [33]Lea R, Mitchell L J, Mader S F, et al. An approach to the inventory of forested wetlands for timber - harvesting impact assessment. *Forest Ecology and Management*, 1990, 33(1): 215-225.
- [34]Aust W M, Lea R. Comparative effects of aerial and ground logging on soil properties in a tupelo - cypress wetland[J]. *Forest Ecology and Management*, 1991, 50(1): 57-73.
- [35]Aust W M, Reisinger T W, Burger J A. Soil physical and hydrological changes associated with logging a wet pine flat with wetdited skidders[J]. *Southern Journal of Southern Forestry*, 1993, 17(1): 22-25.
- [36]王慎强,李欣,徐富安,等. 长期施用化肥与有机肥对潮土土壤物理性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 77-78.
- [37]张学权,胡庭兴. 林(竹)草不同植被恢复模式下的土壤物理特性[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 623-627.
- [38]姜培坤,徐秋芳. 集约经营毛竹林土壤微生物量与多样性研究[C]. 中国竹业发展论坛论文集, 2005.
- [39]Jesper Luxhøi, Sander Bruun, Bo Stenberg, et al. Prediction of gross and net nitrogen mineralization immobilization turnover from respiration[J]. *Soil Science Society of America*, 2005, 70(4): 1121-1128.
- [40]王火焰,周健民,陈小琴,等. 氮磷钾肥料在土壤中转化过程的交互作用 II. 硫酸铵在水稻土中的转化[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 70-77.
- [41]刘菊秀,周国逸,褚国伟,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 763-767.