

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19544

鼎湖山不同植被类型下土壤肥力质量变化

张杰¹, 金志农¹, 张海燕¹, 赵姣¹, 肖昌龙¹, 张北红¹, 刘佳^{2*}

(1. 南昌工程学院, 江西省樟树繁育与开发利用工程研究中心, 江西 南昌 330099;

2. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 江西 南昌 330200)

摘要:为探究我国南亚热带不同植被类型下土壤肥力质量变化,以鼎湖山自然保护区内6种典型植被土壤为研究对象,通过野外调查取样与室内分析相结合的方法,系统考察了14项土壤物理、化学和生物肥力指标,运用主成分分析、聚类分析对各植被类型的土壤肥力质量进行综合评价。结果表明:1)鼎湖山原始顶级植被群落阔叶林的土壤物理结构良好、化学养分充足、生物肥力最高;马尾松林土壤的物理、化学和生物肥力均严重退化,竹林和混交林土壤的各项肥力指标大多介于阔叶林和马尾松林之间。2)与阔叶林相比,施用有机肥可改善茶园土壤的容重、含水量、速效化学养分、pH和CEC,但其全量化学养分仍大幅降低,且生物肥力也明显下降。3)主成分分析将14个肥力指标降维为2个主成分,累积方差贡献率达到75.75%,基于主成分分析的各植被类型土壤肥力质量得分排序为:阔叶林(0.60)>老茶园(0.33)>新茶园(0.12)>竹林(0.04)>混交林(-0.01)>马尾松林(-1.08)。4)通过聚类分析可将鼎湖山不同植被类型的土壤肥力质量分为4类:第I类为阔叶林,第II类为新、老茶园,第III类为竹林和混交林,第IV类为马尾松林。综上,鼎湖山不同植被类型的土壤肥力质量显著不同,原始阔叶林被破坏后,各种新的植被类型都会使土壤肥力质量明显降低,但变化各异,建议针对不同的植被类型采取不同的调控管理措施,以恢复和提高土壤肥力质量。

关键词:植被类型;土壤肥力;主成分分析;综合评价;鼎湖山

鼎湖山位于广东省肇庆市东北近郊,纬度在北回归线南侧,属南亚热带典型季风气候。由于受副热带高压的强烈影响,北回归线附近陆地多为沙漠、半沙漠或干旱草原,而鼎湖山却拥有从针叶林先锋群落到季风常绿阔叶林顶极群落的完整演替植被类型,其中季风常绿阔叶林的林龄长达400余年,因而鼎湖山被誉为“北回归线上的绿色明珠”,成为我国首个国家级自然保护区,并首批加入联合国教科文组织“人与生物圈计划”^[1-3]。由于在自然地理、生态环境等方面的特殊性及其代表性,鼎湖山已成为广大学者研究南亚热带典型季风气候区植物和土壤特征的良好平台^[4-7]。

土壤肥力质量是土壤保持生产力、维持生态环境稳定的能力,是土壤最基本的内在属性和本质特征。土壤肥力质量主要由物理肥力、化学肥力和生

物肥力组成^[7],研究土壤肥力质量变化有助于保护土地资源,防治土壤退化。植被类型是决定土壤肥力质量的关键因素,前人在宁夏贺兰山^[8]、贵州雷公山^[9]、甘肃兴隆山^[10]等我国多处自然保护区的研究均发现,不同植被类型的土壤肥力质量存在显著差异,但各具区域特征,主要与各保护区独特的气候条件和成土母质有关,因而对于不同的研究区域及植被类型有必要针对性的探明。然而,目前未见关于鼎湖山自然保护区不同植被类型下土壤肥力质量的研究报道。此外,近些年来随着社会经济快速发展,以鼎湖山为代表的城市近郊风景区在进行环境保护的同时,也大力发展旅游业及生态农业,其土壤肥力的影响因素及变化途径更加复杂,并且这种多元变化将是全国范围内的长期趋势,但以往研究几乎未将此形式下的土壤肥力质量变化纳入考虑。因此,本研究选择鼎湖山多种具有代表性的植被类型,综合考察其土壤肥力质量变化状况,以期为鼎湖山及我国南亚热带相似自然保护区的科学经营管理、土地合理利用提供参考。

收稿日期:2019-11-19;录用日期:2020-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31660599,41661052,31560582);江西省教育厅科技项目(GJJ151120)。

作者简介:张杰(1983-),女,山东省济南市人,讲师,博士,主要从事土壤肥力演变等方面的研究。E-mail:mn_zhangjie@163.com。

通讯作者:刘佳,E-mail:liujia422@126.com。

1 材料与方法

1.1 研究区和样地概况

鼎湖山自然保护区(简称鼎湖山, 112° 30' 39" ~ 112° 33' 41" E, 23° 09' 21" ~ 23° 11' 30" N)总面积约 1 155 hm², 属典型的南亚热带季风湿润型气候, 年均气温 20.9 °C, 最热月(7月)和最冷月(1月)的平均气温分别为 28.0 和 12.0 °C, 年均降水量和蒸发量分别为 1 956 和 1 115 mm, 每年 4 ~ 9 月为雨季, 降雨量占全年的 80.38%^[3]。

鼎湖山植被覆盖率高达 85% 以上, 植物群落结构复杂、物种丰富, 长期以来是进行森林生态系统定位观测的良好平台。本研究在鼎湖山自然保护区的核心区及其周边扩展区进行, 基于相同土壤母质背景研究不同植被类型的土壤肥力质量变化, 具体包括: ①季风常绿阔叶林(简称阔叶林, MPF), 为南亚热带最具代表性的天然植被类型, 属当地植被演替顶级阶段, 典型植物为荷木(*Schima superba*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)等; ②马尾松针叶林(简称马尾松林, PF), 为 20 世纪 30 年代部分原始阔叶林遭破坏后人工种植的植被类型, 属植被演替初级阶段, 典型植物为马尾松(*Pinus massoniana*)、黄牛木(*Cratoxylon ligustrinum*)、三叉苦(*Evodia lepta*)等; ③针阔叶混交林(简称混交林, CBF), 为人工种植的马尾松林受到阔叶树种入侵而形成的过渡林型, 属植被演替中级阶段, 其典型植物为马尾松、荷木、锥栗、厚壳桂、红皮紫椴(*Craibiodendron kwangtungense*)和滇粤山胡椒(*Lindera metcalfiana*)等^[11-12]; ④竹林(BF), 为 20 世纪 80 年代人工种植, 其典型种类为刚竹(*Phyllostachys viridis*)等; ⑤老茶园(OT)和⑥新茶园(NT)分别为 20 世纪 90 年代中后期和 2007 年前后种植。在不考虑干、湿沉降的情况下, ①~④植被类型的年养分投入量为 0, 同时也无生产物质外移; ⑤和⑥为了维持生产水平、改善产品质量、获得更高的经济效益, 种植过程中常年施用有机肥(以花生麸、畜禽粪便为主), 无化肥、农药输入, 年养分投入量约为 N 300 ~ 450 kg/hm²、P₂O₅ 70 ~ 100 kg/hm²、K₂O 120 ~ 180 kg/hm²。上述各种植被的土壤类型均为由砂页岩发育而来的赤红壤, 原始植被均为阔叶林^[12-13], 只是自 20 世纪

30 年代起由于自然或人为因素使植被类型发生了相应改变。

1.2 样品采集与处理

于 2015 年 4 月在鼎湖山对上述 6 种植被类型进行土壤样品采集。采样时每种植被选择 3 块样地作为重复, 每块样地间隔 >30 m, 面积 >100 m² (10 m × 10 m), 在每块样地内用 50 cm³ 环刀取土 3 份用于测定土壤容重, 而后按“S”形随机布设 10 个取样点采集 0 ~ 20 cm 表层土壤, 多点混合后制得该样地土样。将采集的土样装入保鲜箱中, 带回实验室尽快拣除植物残体、石块等杂物, 过 2 mm 筛充分混匀后分为两份, 一份风干后用于测定土壤理化性质, 另一份保存于 4 °C 冰箱中用于测定土壤可溶性有机碳、土壤微生物生物量。

1.3 测试指标与方法

土壤常规性质的测定参照鲁如坤^[14]的方法进行。土壤容重(BD)采用环刀法测定, 含水量(WC)采用铝盒法测定, pH 采用电位法测定(水:土=2.5:1), 有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定, 全氮(TN)采用凯氏定氮法测定, 全磷(TP)采用碳酸钠熔融法测定, 全钾(TK)采用氢氧化钠熔融法测定, 碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定, 有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定, 阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵法测定。土壤可溶性有机碳(DOC)用超纯水(水:土=5:1)提取后过 0.45 μm 水系滤膜, 滤液用 multi N/C 3100 分析仪(Germany)测定。土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸法提取^[15]、multi N/C 3100 分析仪测定。

1.4 数据统计

试验数据经 Excel 2003 整理后, 用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan 多重比较、Pearson 相关性分析、主成分分析及聚类分析。Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型的土壤物理肥力

土壤容重可以综合反映土壤颗粒及孔隙状况, 通常土壤容重越小, 土体结构越疏松、孔隙越多, 越利于土壤养分的活化及植物根系的生长。不同植被类型的土壤容重有显著差异(图 1A), 相对于

原始植被阔叶林, 竹林和老茶园的容重与之差异不明显, 这可能是由于前者地下根茎茂密、成片匍匐生长, 而后者常年施用有机肥, 但施用有机肥时间较短的新茶园, 以及马尾松林和混交林的容重却显著高于阔叶林, 其容重相对于阔叶林分别提高了13.52%、44.57%和22.28%。土壤含水量除了为动物、植物、微生物供应必要的水分外, 还与矿质养

分的有效性密切相关^[16]。本研究中施用有机肥的茶园土壤含水量最高(图1B), 这可能与有机肥具有良好的保水能力有关; 其他植被类型土壤含水量的大小顺序为阔叶林、竹林>混交林>马尾松林, 这主要与不同植被类型的林龄、盖度、凋落物的数量及持水性等有关^[17]。

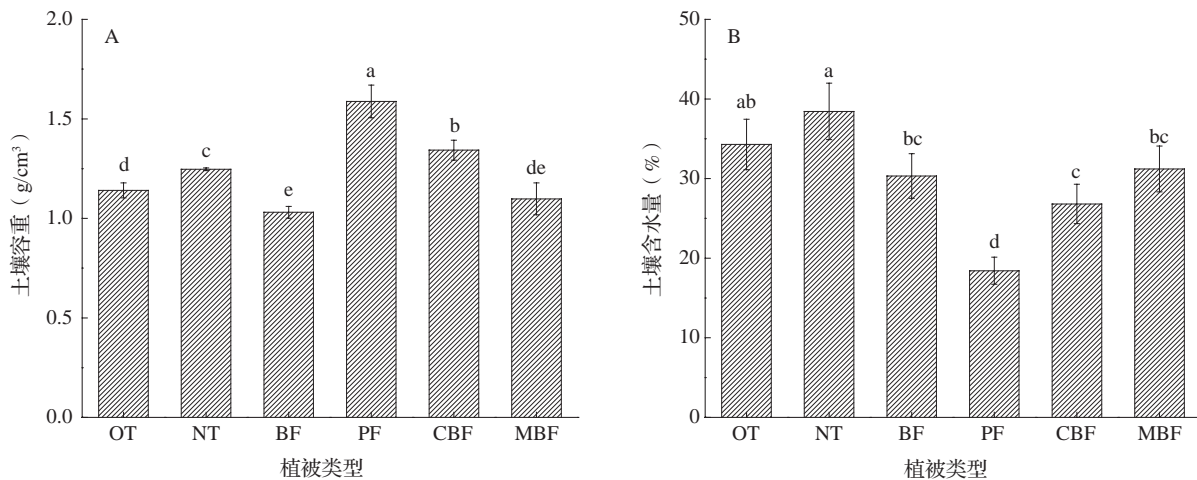


图1 不同植被类型的土壤容重和含水量

注: 不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 不同植被类型的土壤化学肥力

土壤 pH 通过影响土壤微生物的数量和活性、有机物质的分解与转化以及矿质养分的有效态等影响土壤肥力水平^[18-19](表1)。本研究中几种植被类型的土壤 pH 都较低, 均为强酸性土壤, 其中竹林、混交林和阔叶林的 pH 在 3.93 ~ 3.98 之间, 施用有机肥的茶园土壤 pH 有所提升, 而马尾松林的 pH 却显著低于其他各种植被类型。从土壤全量养分看, 土壤有机碳、全氮、全磷的排序大致为阔叶林 > 竹林、混交林 > 茶园 > 马尾松林, 可见鼎湖山

原始阔叶林被破坏后, 其他植被类型都会造成土壤全量养分明显降低。从土壤速效养分看, 土壤可溶性有机碳和有效磷均为茶园 > 阔叶林 > 混交林、竹林 > 马尾松林, 土壤速效钾也以老茶园和阔叶林最高, 可见长期施用有机肥有助于茶园土壤速效养分的积累; 但茶园土壤的碱解氮 (110.25 ~ 135.98 mg/kg) 显著低于阔叶林 (162.93 mg/kg); 马尾松林土壤的碱解氮仅为 46.55 mg/kg, 大幅低于其他各种植被类型。土壤 CEC 可以反映土壤的保肥供肥能力, 各植被类型土壤 CEC 的大小顺序为阔叶林、

表1 不同植被类型的土壤化学肥力特征

植被类型	pH	SOC	TN	TP	TK	DOC	AN	AP	AK	CEC
		(g/kg)				(mg/kg)				(cmol/kg)
OT	4.18a	20.79d	1.63c	0.29c	28.56a	270.29a	135.98b	3.43a	75.83a	22.15a
NT	4.10a	18.38e	1.88b	0.22d	21.86b	270.81a	110.25c	2.02b	42.50c	22.05a
BF	3.97a	30.47b	2.02b	0.31bc	16.88d	193.16c	149.45ab	1.66bc	27.50d	18.95b
PF	3.50b	8.28f	1.16d	0.20d	22.10b	123.51d	46.55d	1.45c	38.33c	11.88d
CBF	3.93a	26.28c	2.07b	0.37a	18.54c	190.58c	131.08b	1.71bc	52.50b	17.24c
MBF	3.98a	32.62a	2.28a	0.33b	27.73a	237.55b	162.93a	1.78bc	74.17a	22.69a

注: 同一列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

茶园 > 竹林 > 混交林 > 马尾松林。

2.3 不同植被类型的土壤生物肥力

土壤微生物生物量是土壤养分转化的源和库,其含量高低可以反映土壤微生物的活动强弱及养分转化的速率快慢,因此是表征土壤生物肥力的重要指标。各植被类型中以阔叶林的土壤 MBC 最高(图 2A),达到 725.8 mg/kg; 茶园、竹林和混交林的土

壤 MBC 在 341.5 ~ 419.6 mg/kg 之间,相当于阔叶林的 47.1% ~ 57.8%; 马尾松林的土壤 MBC 仅为 216.8 mg/kg,显著低于其他植被类型。土壤 MBN 也以阔叶林最高(图 2B),达到 68.7 mg/kg,混交林、竹林和马尾松林的土壤 MBN 与阔叶林相比均显著降低,降幅分别为 22.1%、39.1% 和 70.4%,茶园土壤 MBN 相当于阔叶林的 74.1% ~ 85.9%。

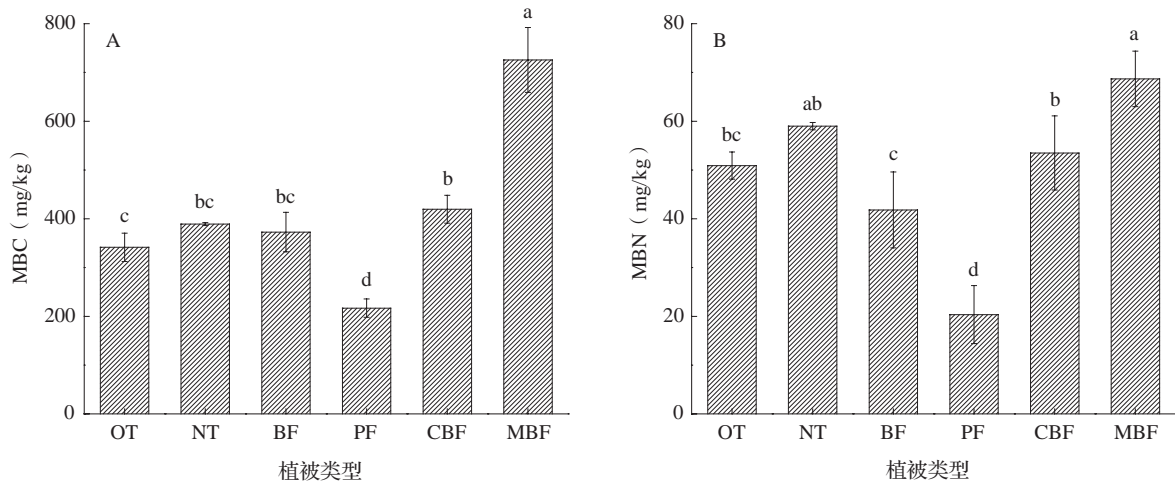


图 2 不同植被类型的土壤 MBC 和 MBN 含量

2.4 土壤肥力指标间的相关关系

对土壤各项物理、化学和生物肥力指标进行相关分析发现(表 2),土壤容重与大多数的肥力指标呈显著负相关关系,表明土壤容重越大,肥力状况越差。土壤含水量和 pH 主要与可溶性有机碳、碱解氮、CEC 和 MBN 指标呈显著正相关关系。土壤全量养分中,有机碳、全氮、全磷相互间具有显著正相关关系,表明它们在不同土壤上具有相似的变化规律,且它们对土壤碱解氮含量具有非常强的正向促进作用,相关系数均 >0.75。土壤速效养分中,可溶性有机碳与碱解氮、有效磷、速效钾均具有显著相关性,相关系数为 0.54 ~ 0.65,但碱解氮、有效磷、速效钾三者之间仅有效磷和速效钾具有显著相关性。土壤 CEC 与除全磷、全钾外的所有全量养分和速效养分均具有显著正相关关系。土壤 MBC、MBN 主要与土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、CEC 指标有显著正相关关系。总体来看,本研究所选的 14 个肥力指标间具有复杂的相关性,不同指标间存在信息重叠现象,采用单一或部分指标不能反映土壤肥力特征全貌,因此需要通过主成分分析、聚类分析等对鼎湖山不同植被类型的土壤肥力状况进行综合评价。

2.5 不同植被类型土壤肥力质量的主成分分析

通过主成分分析可以看出(表 3),前 2 个主成分的方差贡献率分别为 43.02% 和 32.73% (其余均 <10%),累积达 75.75%,能解释数据的大部分变异,因而本研究运用主成分分析进行土壤肥力质量的综合评价是可信的。所获得的 2 个主成分的表达式为:

$$PC_1 = -0.118X_1 + 0.013X_2 + 0.019X_3 + 0.204X_4 + 0.197X_5 + 0.179X_6 - 0.115X_7 - 0.016X_8 + 0.157X_9 - 0.122X_{10} - 0.045X_{11} + 0.044X_{12} + 0.141X_{13} + 0.101X_{14} \quad (1)$$

$$PC_2 = -0.023X_1 + 0.141X_2 + 0.126X_3 - 0.102X_4 - 0.092X_5 - 0.109X_6 + 0.234X_7 + 0.197X_8 - 0.016X_9 + 0.253X_{10} + 0.183X_{11} + 0.138X_{12} - 0.029X_{13} + 0.053X_{14} \quad (2)$$

式中 X_1 、 X_2 、……、 X_{14} 分别为土壤容重、含水量、pH、有机碳、全氮、全磷、全钾、可溶性有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾、CEC、MBC 和 MBN 指标标准化后的数值。根据上述表达式可以计算出不同植被样点在 2 个主成分上的得分值,结合各肥力指标的载荷值,可以绘制出土壤肥力质量主成分分析示意图(图 3)。可以看出,不同植被类型的样点分布存在明显差异,阔叶林、竹林和混交林分布在 PC1 轴的正端,阔叶林和新、老茶园分

表 2 土壤肥力指标相关系数矩阵

	BD	WC	pH	SOC	TN	TP	TK	DOC	AN	AP	AK	CEC	MBC	MBN
BD	1.00													
WC	-0.68**	1.00												
pH	-0.67**	0.69**	1.00											
SOC	-0.82**	0.40	0.45	1.00										
TN	-0.69**	0.43	0.43	0.90**	1.00									
TP	-0.52*	0.13	0.33	0.83**	0.72**	1.00								
TK	-0.15	0.25	0.20	-0.04	-0.06	-0.07	1.00							
DOC	-0.65**	0.89**	0.75**	0.37	0.47	0.18	0.50*	1.00						
AN	-0.88**	0.59*	0.56*	0.93**	0.84**	0.75**	0.14	0.59**	1.00					
AP	-0.33	0.43	0.56*	-0.02	-0.07	0.04	0.59*	0.65**	0.26	1.00				
AK	-0.23	0.28	0.38	0.25	0.24	0.34	0.84**	0.54*	0.40	0.61**	1.00			
CEC	-0.79**	0.87**	0.67**	0.60**	0.65**	0.33	0.47	0.94**	0.78**	0.52*	0.53*	1.00		
MBC	-0.54*	0.32	0.28	0.75**	0.80**	0.53*	0.36	0.41	0.71**	-0.07	0.53*	0.62**	1.00	
MBN	-0.60**	0.64**	0.49*	0.65**	0.82**	0.51*	0.35	0.76**	0.74**	0.23	0.54*	0.85**	0.81**	1.00

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

布在 PC2 轴的正端，而马尾松林独自居于 PC1 轴和 PC2 轴的负端。从各肥力指标来看，土壤容重、有机碳、全氮、全磷、碱解氮及 MBC、MBN 在 PC1 轴上的载荷值较高（绝对值均 > 0.70 ），表明这些指标与 PC1 相关性较高，并且除容重外均对土壤肥力质量有正效应；而全钾、可溶性有机碳、有效磷、速效钾及 CEC 在 PC2 轴上的载荷值均 > 0.70 ，表明这些指标与 PC2 的相关性较高，也均对土壤肥力质量有正面影响。

表 3 主成分分析法的特征根值与方差贡献率

因子	特征根值	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
PC1	6.02	43.02	43.02
PC2	4.58	32.73	75.75

根据不同植被样点在 PC1 和 PC2 上的得分值，结合各主成分的方差贡献率（即各主成分所占权重），可进一步计算出不同植被样点在每个主成分上的加权得分及综合得分（表 4）。可以看出，在 PC1 上的得分顺序为：阔叶林 $>$ 竹林、混交林 $>$ 新茶园 $>$ 老茶园 $>$ 马尾松林，表明与原始阔叶林相比，其他植被类型的土壤全量养分（除全钾）、碱解氮和微生物生物量都有所降低；在 PC2 上的得分顺序为：老茶园 $>$ 新茶园、阔叶林 $>$ 混交林、竹林、马尾松林，表明阔叶林植被改变后，施用有机肥的茶园可以明显提

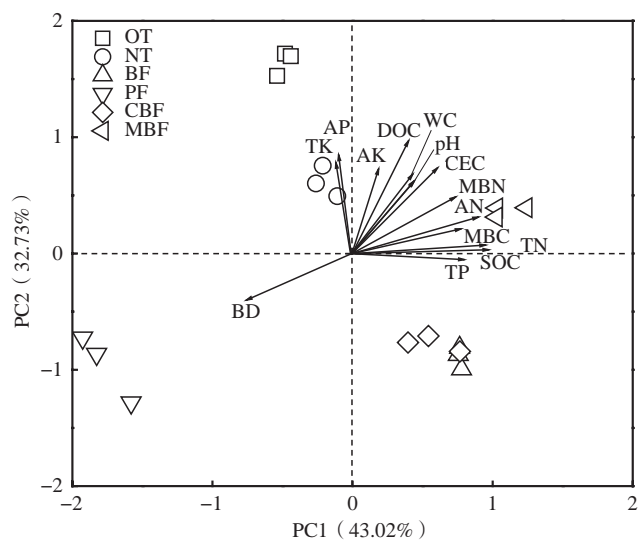


图 3 土壤肥力质量主成分分析示意图

高土壤的速效养分（除碱解氮）和 CEC，尤其以长期施肥的老茶园最为明显，但不施肥的其他植被类型的上述养分明显降低。经加和得到的综合得分能更直观地反映土壤肥力的总体状况，其排序为阔叶林 $>$ 老茶园 $>$ 新茶园 $>$ 竹林、混交林 $>$ 马尾松林，可见鼎湖山原始阔叶林被破坏后，无论何种新的植被类型都会使土壤整体肥力质量显著降低。

2.6 不同植被类型下土壤肥力质量的聚类分析

以欧式距离作为衡量指标、采用最短距离法对土壤各项肥力指标进行系统聚类，可将不同植被类型的土壤肥力质量分为 4 类（图 4）：第 I 类为阔

表 4 不同植被类型下土壤肥力质量得分

植被类型	样点得分		样点加权得分		综合得分
	PC1	PC2	PC1	PC2	
OT	-0.49 ± 0.05d	1.65 ± 0.10a	-0.21 ± 0.02d	0.54 ± 0.03a	0.33 ± 0.05b
NT	-0.20 ± 0.08c	0.62 ± 0.13b	-0.08 ± 0.03c	0.20 ± 0.04b	0.12 ± 0.04c
BF	0.78 ± 0.01b	-0.90 ± 0.10c	0.33 ± 0.01b	-0.30 ± 0.03c	0.04 ± 0.03d
PF	-1.78 ± 0.18e	-0.96 ± 0.29c	-0.76 ± 0.08e	-0.31 ± 0.09c	-1.08 ± 0.02e
CBF	0.57 ± 0.19b	-0.78 ± 0.07c	0.25 ± 0.08b	-0.26 ± 0.02c	-0.01 ± 0.07d
MBF	1.11 ± 0.12a	0.37 ± 0.05b	0.48 ± 0.05a	0.12 ± 0.02b	0.60 ± 0.06a

注：表中数据为平均值 ± 标准差。

叶林，其主要特征是土壤的各项物理、化学和生物肥力均较优，土壤肥力整体质量最高；第Ⅱ类为新、老茶园，其受人类活动影响大，施用有机肥使得土壤容重、含水量等物理肥力较优，土壤 pH、速效养分和 CEC 等化学肥力也得到改善，但由于原始植被破坏、耕作栽培措施及产品收获等原因，使土壤全量养分、碱解氮及 MBC 有所退化；第Ⅲ类为竹林和混交林，其受人类活动影响较小，各项肥力指标大多居中，介于阔叶林和马尾松林之间；第Ⅳ类为马尾松林，其物理、化学和生物肥力在所有植被类型中均最低，土壤肥力质量最差。

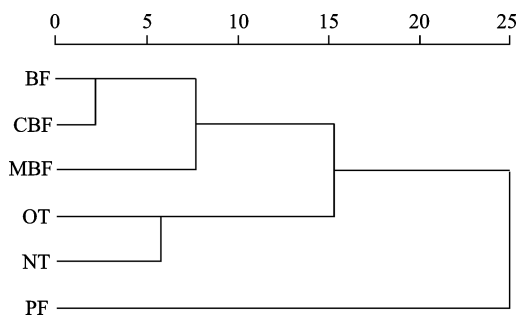


图 4 不同植被类型下土壤肥力质量的聚类分析

3 讨论

用以评价土壤肥力质量的指标众多，在实际研究中往往选择具有代表性、重现性好、能够反映土壤关键肥力的指标进行考察。本研究参照“土壤肥力评价最小数据集”^[20]所提供的指标并适当扩充，最终选择了 14 个常用的物理、化学及生物肥力指标进行分析，以实现既简明扼要又相对全面反映鼎湖山不同植被类型土壤肥力质量的目的。主成分分析、聚类分析是进行土壤肥力质量综合评价时广泛使用的分析方法^[7-8, 21]，前者的优点在于可将具有错综复杂相互关系的多个原始变量降维为少数独立

新变量，进而使土壤肥力质量评价结果得以量化并排序；后者的优点在于将具有相似肥力特征的处理归为一类，并根据需要进行土壤肥力等级划分。合理使用这两种方法可客观、可靠地评价土壤肥力质量的变化方向及幅度，并为其管理和调控提供参考。

导致土壤肥力质量变化的根本原因在于系统内物质输入量与输出量的相对大小，即物质的输入量大于输出量，土壤肥力质量提升，反之降低^[22]。本研究中，受人类活动影响较小、无外源养分输入的阔叶林、混交林、马尾松林和竹林，其土壤肥力主要受植被类型的影响，尤其与凋落物的数量和性质有关^[23]。凋落物分解是森林生态系统物质循环和能量流动的重要环节，其分解过程是土壤及植物获得养分的主要途径，也是维持生态系统生产力的关键因素。闫俊华等^[24]研究发现，鼎湖山阔叶林、马尾松林的年凋落物量分别为 8.84 和 2.53 t/hm²，阔叶林高达马尾松林的 3.49 倍，且阔叶林凋落物的氮、磷含量高，分别相当于马尾松林的 1.94 ~ 2.66 倍和 1.69 ~ 2.88 倍^[25]；另一方面，阔叶林凋落物的 C/N 在 20 ~ 40 之间，木质素含量低，易于腐解，其周转期仅为 1.4 年，而马尾松林凋落物的 C/N 很高，含有大量不易分解的单宁、树脂和蜡质，其周转期长达 4.9 年^[24-25]。凋落物数量和性质的巨大差异使得阔叶林每年向土壤归还的碳、氮、磷养分要远大于马尾松林，因而土壤肥力指标中的全量及速效碳、氮、磷养分均为阔叶林显著高于马尾松林。此外，阔叶林大量易分解的凋落物进入土壤，也改善了土壤的物理及生物学性状，使得土壤疏松，容重降低，保水能力增强，微生物生物量维持在较高水平；而马尾松林凋落物的特殊性质使得该植被类型下土壤的物理、化学和生物肥力均显著退化。凋落物归还还通过促进植物生长来增

加覆盖保护,减少水土流失等方式影响土壤肥力质量^[19]。由于竹林和混交林凋落物的数量和性质介于阔叶林和马尾松林之间^[23-25],因此其大多数的肥力指标也介于二者之间,钾素较为特殊,其原因有待进一步探明。从生态系统进化的角度看,土壤肥力质量既受植被群落的影响,也通过影响植物生长反作用于群落的产生、发展和演替,这种相互促进作用会随着时间的延长趋于稳定,直至进化成适应区域气候环境、符合生态平衡的顶级群落^[26]。对于处于南亚热带典型季风气候区的鼎湖山而言,马尾松林、混交林和阔叶林分别代表了其森林演替的初级、中级和顶级阶段,这也与三者土壤肥力质量逐步提升的顺序相一致。

人们为了追求更高的经济利益常改变土地利用方式,近些年来这种现象在以鼎湖山为代表的城市近郊风景区非常普遍。然而森林改变为农田后常会使土壤肥力质量显著降低,尽管有机肥养分全面、肥效缓慢,长期施用可全面改善土壤肥力质量,但从本研究结果可以看出,不论是施用有机肥20年的老茶园还是仅7年的新茶园,其土壤肥力质量相对于阔叶林仍明显退化,这主要是因为植被的破坏、土壤的垦殖以及产品的收获强烈改变了养分物质循环过程,使净输出量大于净输入量。具体来看,施用有机肥在改善土壤物理性状、速效化学养分及pH、CEC等方面的效果显著,但无法避免土壤全量养分及生物肥力的大幅降低,这与以往农田试验^[7]所得结论差异较大,可见施肥补偿并不能完全遏制林地利用方式转变所导致的土壤退化趋势。

根据本研究结果可为鼎湖山及我国南亚热带相似自然保护区的经营管理、土地利用提供以下建议:1)对于已达到生态平衡的顶级植被群落应加强保护,减少人为扰动和破坏,维持植物、土壤及微生物之间的良好平衡关系;2)对于已形成的植被破坏地,可适当人为介入使其植被类型直接恢复到当地顶级群落类型,从长期来看可能更有利于土壤肥力质量的保持、生态环境的稳定;3)对于已形成的演替初级、中级阶段植被类型(如鼎湖山的马尾松林),在条件允许的情况下可加强抚育管理,适当增施有机肥,改善土壤肥力状况,以促进植物的生长发育及演替进程;4)谨慎改变林地利用方式,对于已长期耕作的林改地,在土壤退化严重、经济效益降低时应“退耕还林”,恢复其原有植被类型。

4 结论

通过对鼎湖山6种典型植被类型的土壤肥力质量进行考察并分析评价,主要结论为:

(1)鼎湖山原始顶级植被群落阔叶林的土壤物理结构良好、化学养分充足、生物肥力最高;马尾松林土壤的物理、化学、生物肥力均严重退化,竹林和混交林土壤的各项肥力指标大多介于阔叶林和马尾松林之间。

(2)与原始阔叶林相比,施用有机肥可明显改善茶园土壤的物理肥力、速效化学养分、pH和CEC,但无法避免土壤全量养分的大幅降低,而且长期施用有机肥可能会导致土壤生物肥力下降。

(3)运用主成分分析和聚类分析对各植被类型的土壤肥力质量进行综合评价,其得分排序为:阔叶林(0.60)>老茶园(0.33)>新茶园(0.12)>竹林(0.04)>混交林(-0.01)>马尾松林(-1.08),并可分为4类:阔叶林(I)、新、老茶园(II)、竹林和混交林(III)、马尾松林(IV)。

参考文献:

- [1] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175 (3): 573-583.
- [2] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils [J]. *Science*, 2007, 314: 1417-1417.
- [3] 王峥峰,王伯荪,张军丽,等. 广东鼎湖山3个树种在不同群落演替过程中的遗传多样性[J]. *林业科学*, 2004, 40 (2): 32-37.
- [4] Yan J H, Zhang D Q, Zhou G Y, et al. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (5): 991-999.
- [5] 莫江明,薛璟花,方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对N沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24 (7): 1413-1420.
- [6] 王超,李亚芳,徐润林. 鼎湖山不同植被类型下土壤肉足虫群落结构的比较研究[J]. *土壤*, 2017, 49 (3): 580-587.
- [7] 陈留美,桂林国,吕家珑,等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡灰钙土土壤肥力质量[J]. *土壤*, 2008, 40 (6): 971-975.
- [8] 姜林,耿增超,张雯,等. 宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征[J]. *生态学报*, 2013, 33 (6): 1982-1993.
- [9] 张珍明,贺红早,张玉武,等. 雷公山自然保护区不同植被类型土壤的肥力及碳含量[J]. *西南农业学报*, 2014, 27

- (3): 1202–1206.
- [10] 曹靖, 陈琦, 常雅军, 等. 甘肃兴隆山自然保护区森林演替对土壤肥力影响的评价 [J]. 水土保持研究, 2009, 16 (4): 89–93.
- [11] Mo J M, Brown S, Xue J H, et al. Response of litter decomposition to simulated nitrogen deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China [J]. *Plant and Soil*, 2006, 282 (1): 135–151.
- [12] 黄文娟, 刘菊秀, 唐旭利, 等. 鼎湖山 5 种森林土壤的无机氮和有效磷含量 [J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15 (4): 441–447.
- [13] 李银, 曾曙才, 黄文娟. 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (3): 631–636.
- [14] 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, 2000.
- [15] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19 (6): 703–707.
- [16] 刘东阳, 汪俊玉, 武雪萍, 等. 温室沟灌条件下不同水氮用量对番茄产量、品质及水肥利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (6): 112–117.
- [17] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸, 等. 鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性 [J]. 林业科学, 2013, 49 (9): 8–15.
- [18] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18 (5): 1853–1864.
- [19] 张杰, 张海燕, 赵娇, 等. 樟树人工林对湘东退化红壤性质及微生物碳源利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32 (6): 333–339.
- [20] 郑立臣, 宇万太, 马强. 农田土壤肥力综合评价研究进展 [J]. 生态学报, 2004, 23 (5): 156–161.
- [21] 吴会军, 张淑香, 任意. 黑龙江克山县耕地肥力要素多元分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 53–57.
- [22] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化 [J]. 中国农业科学, 2007, 40 (8): 1712–1721.
- [23] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. 林业科学, 2006, 42 (4): 93–100.
- [24] 闫俊华, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山 3 种演替群落凋落物及其水分特征对比研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12 (4): 509–512.
- [25] 陈法霖, 郑华, 阳柏苏, 等. 中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (11): 3027–3035.
- [26] 于扬, 杜虎, 宋同清. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征 [J]. 生态学报, 2013, 33 (23): 7455–7466.

Changes of soil fertility quality under different vegetation types of Dinghushan in subtropical China

ZHANG Jie¹, JIN Zhi-nong¹, ZHANG Hai-yan¹, ZHAO Jiao¹, XIAO Chang-long¹, ZHANG Bei-hong¹, LIU Jia^{2*}
 (1. Nanchang Institute of Technology, Jiangxi Provincial Engineering Research Center for Seed-breeding and Utilization of Camphor Trees, Nanchang Jiangxi 330099; 2. Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang Jiangxi 330200)

Abstract: In order to study the changes of soil fertility quality under different vegetation types in Dinghushan National Nature Reserve, soils of six representative vegetation types were sampled, and 14 soil physical, chemical and biological indices were determined in laboratory. And then, principal component analysis and cluster analysis were used to comprehensively evaluate the soil fertility quality. The results showed that: 1) The soil in broad-leaved forest had good physical structure, sufficient chemical nutrients and the highest biological fertility; while the soil physical, chemical and biological fertility in *Pinus massoniana* forest were seriously degraded, and most of the soil fertility indices in bamboo forest and mixed forest were between broad-leaved forest and *Pinus massoniana* forest. 2) Compared with broad-leaved forest, application of organic fertilizer improved the bulk density, water content, available chemical nutrients, pH and CEC of tea garden soils, but soil total chemical nutrients were still obviously decreased. Moreover, the biological indicators of tea garden soils were also decreased obviously. 3) Principal component analysis transformed 14 fertility indices into 2 principal components by data dimensionality reduction, and the 2 principal components explained 75.75% of the total variance. The soil fertility quality scores under different vegetation types based on principal component analysis were ranked as follows: broad-leaved forest (0.60) > old tea garden (0.33) > new tea garden (0.12) > bamboo forest (0.04) > mixed forest (-0.01) > *Pinus massoniana* forest (-1.08). 4) The soil fertility quality under different vegetation types in Dinghushan could be divided into 4 groups by cluster analysis: (I) broad-leaved forest, (II) tea garden, (III) bamboo forest and mixed forest, (IV) *Pinus massoniana* forest. In conclusion, the soil fertility quality under different vegetation types in Dinghushan showed significantly different. The shifts of vegetation types from natural broad-leaved forest to other types would lead to decrease soil fertility quality, but with varying variations. Therefore, it is suggested that different control and management measures should be adopted for different vegetation types to restore and improve soil fertility quality.

Key words: vegetation types; soil fertility; principal component analysis; comprehensive evaluation; Dinghushan