

云南澜沧县景迈古茶园土壤养分和土壤酶活性研究

姜虹^{1,2}, 沙丽清^{1*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 云南省分布着大量的古茶园, 被认为是普洱茶的起源。澜沧县景迈古茶园是典型的栽培型古茶园, 在古茶园区内大平掌处选择相邻的古茶园、台地茶园和天然林三种利用类型的土壤, 进行了土壤养分和土壤酶活性的调查。结果表明: 三种类型的土壤都呈明显的酸性, 土壤 pH 在 3.80~3.91, 茶园土壤的酸度相对更低; 三种类型的土壤主要养分含量和酶活性在表层 0~20 cm 都比下层 20~40 cm 高, 但 Mg、Al 和 K 无明显的垂直分布; 三者有机质含量都很高, 有机质和氮的含量分布为台地茶园 < 古茶园 < 天然林, 而磷含量为古茶园最高; 土壤酶活性的差异与养分的差异不一致, 不同的酶活性在三种土壤中的大小规律不一样; 土壤 pH 与金属元素相关性显著, 氮元素与其它养分相关性最强, 养分与土壤酶活性有显著相关性, 尤其是 C、N、P 和 K 等主要营养元素。

关键词: 古茶园; 台地茶园; 天然林; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: S571.1; S154

文献标识码: A

文章编号: 1000-369X(2008)03-214-07

Characteristics of Soil Nutrients and Enzyme Activity of Ancient Tea Garden in Jingmai, Lancang, Yunnan Province

JIANG Hong^{1,2}, SHA Li-qing^{1*}

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Ancient tea gardens in Yunnan Province are regarded as the provenance of Pu-erh Tea, and the ancient tea garden (ATG) in Jingmai, Lancang County is a typical example of cultivated ATGs. In order to investigate soil nutrients and enzyme activity, the ATG soil in Jingmai and its neighboring conventional tea garden (CTG) and forest soils were sampled. Soil pH, organic matter (OM), total N (TN), total P (TP), total K (TK), alkaline hydrolyzed N (AN), available P (AP), available K (AK), Ca, Al, Mg, activity of acid phosphatase, catalase, urease and saccharase were analyzed. The results showed that (1) All the soils were acid and at a pH of 3.80~3.91, and pH in tea garden soils was lower than in forest soil. (2), The OM, N, P and soil enzyme activity were rich in top soil (0~20 cm) and poor under 20 cm in different soil layers, while K, Mg and Al showed no obvious difference in different layers. (3) OM was rich in all soils, and the contents of OM, TN and AN were CTG < ATG < forest, while TP and AP were richest in ATG. (4) Enzyme activity showed different distribution patterns in the three soils. (5) Soil pH correlated with metal elements, N existed the most significant correlation with other nutrients, and soil nutrients did certain correlation with soil enzymes, especially N, C, P, K.

Keywords: ancient tea garden, conventional tea garden, forest, soil nutrients, enzyme activity

大叶茶 (*Camellia sinensis* var. *assamica*) 茅、临沧等地作为大叶茶的原产地, 具有悠久
是普洱茶的主要生产原料, 云南西双版纳、思 的植茶历史, 分布着世界上面积最大、树龄最

收稿日期: 2008-01-14

修订日期: 2008-05-04

基金项目: 云南省省院省校合作项目 (YKS200204); 云南省自然科学基金项目 (2004C0052M)

作者简介: 姜虹 (1982—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 生态学专业。Email: jh-iris@hotmail.com *通讯作者: Email: shalq@xtbg.ac.cn

长的千年古茶园^[1]。古茶园生态系统植物多样性丰富,保存了大量的野生植物资源,仅在澜沧县景迈地区的古茶园生态系统中,就调查并记录了 125 科、489 属、943 种和变种^[2]。另外,古茶园作为一种特殊的生态系统,具有自我维持的稳定机制,包括病虫害的自我控制和土壤肥力的自我维持,排除了人为的营养物质供给和病虫害的防治,古茶园的茶叶得以保持其优良品质。景迈古茶园是栽培型古茶园的代 表,现存的古茶树大多数是明清以来种植或自然生长存活下来^[3],这里山高谷深、云雾弥漫、气候温和湿润、土壤肥沃、植被丰富,极适合大叶茶的自然生长^[4]。本研究选择景迈古茶园,研究其土壤养分是探明古茶园土壤肥力自我维持机制的基础。同时,土壤酶和土壤微生物活动、土壤肥力等有较大关联,土壤酶活性与土壤营养因子(N、P、K、C、pH等)具有显著相关性^[5-8],因此本研究中还选择了土壤中较为重要的磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶作为研究对象,为古茶园土壤肥力的自我维持提供进一步的解释依据。

1 研究地区概况

景迈古茶园位于云南省澜沧县惠民乡,其核心区的地理位置为 22°09'37" N, 100°00'57" E,古茶园集中分布在景迈和芒雪两个村寨周围低山上,海拔 1 250~1 550 m。该区属于典型的亚热带山地季风气候,年均温 18.4℃,年均相对湿度 79%,干湿季分明,植物地理成分的热带性明显,土壤属于红壤。本文所涉及的土样采集地位于景迈古茶园区“大平掌”的位置,该处同时存在古茶园、台地茶园和天然林三种不同类型的生态系统,海拔和坡度均比较一致。三种林地内植被的差异较大,古茶园和天然林的物种多样性接近,远高于台地茶园。古茶园内附生(寄生)和草本植物较多,人为干扰大于天然林;天然林植物个体数和均匀度较高,林下凋落物层和腐殖质层较厚,土壤呈褐黑色;台地

茶园植被单一,土壤呈黄棕色。

2 研究方法

2.1 样地设置及采样方法

于 2007 年 9 月下旬(雨季后期),在景迈古茶园区“大平掌”选择古茶园、天然林、台地茶园三种类型,每种类型选取 4 个 10 m × 10 m 样方。样方内用五点法采集土样,采集深度为 0~40 cm,分 0~20 cm、20~40 cm 两层采样,每个样方内 5 个点按相同的层混合后成为一个样品,共计 24 个土样。土样采集后于自封袋之中密封保存,尽快运回实验室。其中土壤酶活性和有效磷测定所用土样为新鲜土样,过 2 mm 筛,其余指标为风干土样过 1 mm 筛。

2.2 分析方法

含水率用烘干法,pH 用 1.0 mol/L KCl 浸提 pH 计法(液:土=2.5:1),碱解氮用 1.8 mol/L NaOH 扩散法,有效磷用 0.03 mol/L NH₄F-0.025 mol/L HCl 浸提钼锑抗比色法,全 P、全 K、Al、Mg 用 HClO₄-HF 消解、ICP-AES 测定,有效钾用 1 mol/L 中性 CH₃COONH₄ (pH=7.0)浸提、ICP-AES 测定,有机质和全氮用 C-N 分析仪直接测定。脲酶活性用苯酚钠次氯酸比色法测定,表示为 mg NH₃-N/g 土 (37℃ 24 h);酸性磷酸酶活性用苯磷酸二钠比色法,表示为 mg 酚/g 土 (37℃ 24 h);蔗糖酶活性用磷钼酸比色法,表示为 mg 葡萄糖/g 土 (37℃ 24 h);过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,表示为 ml 0.1 mol/L KMnO₄/g 土。详细的分析方法见参考文献 9~12。

3 结果与讨论

3.1 有机质和氮、磷营养

从表 1 可以看出,土壤有机质和氮、磷含量都存在垂直分布和水平差异,表层 0~20 cm 比 20~40 cm 深度的土层含量要高;水平方向上,三种林地的有机质、全 N 和碱解 N 含量

存在台地茶园 < 古茶园 < 天然林的规律,主要的差异存在于前两者和天然林之间,而全 P 含量在古茶园中最高,有效 P 含量在各层和整个土壤深度的平均值无显著差异。三种林地的有机质含量都非常高,其原因是:大平掌的海拔较高,温度相对于同地区低海拔较低,而且山上温度日较差大,不利于有机质的矿化,而日照和降雨量都比较充足,有利于植物的生长;茶树为富酚植物,茶叶中的多酚含量比其它植物高得多,会抑制土壤微生物和土壤酶活性,所以茶树落叶在土壤表层的分解比较缓慢^[13];古茶园和天然林,尤其是后者的植被茂密,郁闭度很高,林内湿度高,光照弱,有利于土壤有机质的积累。但由于受到人为干扰比较大,古茶园的郁闭度和凋落物量都比天然林低,加上茶叶的采摘,其有机质含量明显低于天然林,从两者的碳氮比也可以明显看出两者的这种差异。

3.2 土壤 pH 值、钾、钙、镁和铝含量

古茶园所在地属于亚热带气候,土壤为酸性的红壤,所以三种林地都是明显的酸性土,各林地土壤平均 pH 都在 3.80~3.91。可以看出茶树生长对土壤的酸化作用,台地茶园植茶年龄有限,其酸化程度不如古茶园明显,古茶园的土壤显著低于天然林(表 2),台地茶园也有一定的酸化,但与天然林的差异还未达到显著水平。从采集的四个台地茶园土壤可以看出植茶年龄对土壤酸度的影响,1 号和 4 号台地茶样地的茶树年龄相对年轻,均小于 10 年,平均 pH 分别为 3.94 和 3.99,而 2 号和 3 号样地植茶年龄都已经超过 20 年,平均 pH 分别为 3.76 和 3.82。K、Mg 和 Al 等金属元素在土壤中的含量主要与土壤母质相关^[14,15],和土壤的肥力没有明显相关性,所以在全 K、全 Mg 和全 Al 没有氮磷等营养元素那样的垂直分布和水平差异。有效 K 在古茶园和台地茶

表 1 土壤有机质和氮磷含量

Table 1 Contents of soil organic matter, nitrogen and phosphorous

林地类型	采样深度(cm)	有机质(g/kg)	全 N(g/kg)	碱解 N(mg/kg)	全 P(g/kg)	有效 P(mg/kg)	碳氮比
Tea Garden Type	Soil Depth	Organic Matter	Total N	Alkaline hydrolyzed N	Total P	Available P	C/N
古茶园 (ATG)	0~20	88.18B (4.13)	3.49B (0.23)	283.37B (32.59)	0.72A (0.18)	1.051A (0.254)	14.68B (0.35)
	20~40	65.63b (5.26)	2.60a (0.22)	178.35ab (22.00)	0.61a (0.20)	0.824a (0.242)	14.66b (0.65)
	平均值	76.91β (12.83)	3.04β (0.52)	230.86 β (61.76)	0.67 (0.18)	0.937 (0.268)	14.67β (0.49)
台地茶园 (CTG)	0~20	79.34B (13.92)	3.14B (0.51)	240.18B (40.97)	0.43B (0.10)	0.878A (0.154)	14.65B (0.64)
	20~40	60.43b (15.63)	2.46b (0.49)	188.59b (19.85)	0.34b (0.08)	0.504a (0.222)	14.12b (0.90)
	平均值	69.89β (17.02)	2.80β (0.59)	214.39β (40.61)	0.39β (0.10)	0.691β (0.267)	14.38β (0.77)
天然林 (Forest)	0~20	166.35A (19.57)	5.95A (0.61)	318.48A (31.46)	0.57AB (0.03)	1.222A (0.213)	17.26A (0.47)
	20~40	138.52a (21.58)	4.46b (0.63)	290.27a (20.30)	0.55ab (0.05)	0.550a (0.081)	17.98a (0.38)
	平均值	152.23 (23.91)	5.03 (0.83)	304.38 (69.98)	0.56 (0.04)	0.886 (0.395)	17.62 (0.55)

注: 括号里数字表示标准误; 同一栏内相同字母表示无显著差异, 不同字母表示有显著差异 (a=0.05); A、B、C 代表 0~20 cm 土层深度, a、b、c 代表 20~40 cm 土层深度, β、γ、δ 代表 0~40 cm 平均值。

Note: Values in the brackets show the standard error; average means followed by the different letter in the same column are significantly different (a=0.05); A, B, and C stand for the soil depth of 0~20 cm, a, b and c stand for the soil depth of 20~40 cm, and β, γ, and δ stand for average contents of 0~40 cm soil depth.

园总有着明显的水平差异和垂直分布, 表层 0~20 cm 有效 K 的含量高于下层, 古茶园表层土壤的有效 K 含量高于台地茶园, 但下层却比台地茶园低, 垂直差异更显著, 可能原因在于台地茶园的人为施用钾肥。通常把有效 K 含量为 80 mg/kg 作为茶园缺 K 的临界值, 而中国南方茶园更容易缺 K^[16], 景迈古茶园和台地茶园的土壤有效 K 含量在目前看来还是比较丰富的。

3.3 土壤酶活性

土壤酶和土壤养分一样, 古茶园、台地茶园和天然林的四种土壤酶(脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶)活性均随着土层深度的增加而呈现递减趋势, 上层(0~20 cm)高于下层(20~40 cm), 但水平方向上三种林地间土壤酶活性的差异不如 C、N、P 那样一致。脲酶直接参与含氮有机物的转化, 其活性常用来表征土壤氮素供应强度, 而氮素又是对茶树

生长最重要的营养元素。脲酶活性大小为台地茶园 < 天然林 < 古茶园, 台地茶园的脲酶活性不到古茶园的 1/2, 从这个角度上讲古茶园自身维持氮素供应的能力要比传统的台地茶园更有优势。酸性磷酸酶和蔗糖酶活性台地茶园 < 古茶园 < 天然林, 过氧化氢酶活性则古茶园 < 台地茶园 < 天然林。古茶园的脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性高于台地茶园的主要原因在于两者群落结构的差异所造成的小环境的差异。古茶园的物种多样性和天然林较为接近而远高于台地茶园^[2], 其群落结构复杂, 物质循环也较为复杂, 其凋落物、下层草本植物及放养的牲畜, 归还了大量的养分, 使土壤肥力得到了较好的自我维持^[17]。另外, 台地茶园有更高的郁闭度, 减小了气温的日较差, 尤其是保持了较高的夜间温度, 同时也维持了适中的湿度^[18], 而这些因素导致了古茶园土壤酶活性高于台地茶园。

表 2 pH 和金属元素含量

Table 2 Soil pH and contents of metal elements

林地类型 Tea Garden Type	采样深度 (cm) Soil Depth	pH	全 K (g/kg) Total K	有效 K (mg/kg) Available K	全 Ca (g/kg) Total Ca	全 Mg (g/kg) Total Mg	全 Al (g/kg) Total Al
古茶园 (ATG)	0~20	3.80A (0.06)	8.35A (0.88)	139.25A (73.01)	0.27A (0.04)	3.29A (0.43)	65.82A (9.49)
	20~40	3.82a (0.03)	8.57a (1.00)	53.50b (10.47)	0.22a (0.02)	3.37a (0.51)	64.35a (11.03)
	平均值	3.81 (0.04)	8.46 (0.88)	96.38 (66.58)	0.24 (0.04)	3.35 (0.38)	65.09 (9.56)
台地茶园 (CTG)	0~20	3.87A (0.10)	8.74A (1.35)	123.00A (22.73)	0.38A (0.15)	3.30A (0.41)	59.25A (8.20)
	20~40	3.88a (0.11)	8.73a (1.08)	72.50ab (23.01)	0.28a (0.04)	3.40a (0.40)	61.22a (7.15)
	平均值	3.88 (0.10)	8.73 (1.13)	97.75 (34.33)	0.33 (0.13)	3.35 (0.38)	60.21 (7.20)
天然林 (Forest)	0~20	3.88A (0.02)	5.97B (0.28)	90.00A (12.53)	0.46A (0.34)	2.44B (0.23)	69.04A (5.68)
	20~40	3.91a (0.08)	6.03b (0.34)	99.33a (6.66)	0.31a (0.09)	2.48b (0.19)	77.31a (10.19)
	平均值	3.90 (0.05)	6.00 (0.28)	94.67 (10.33)	0.38 (0.24)	2.46 (0.19)	73.18 (8.66)

注: 括号里数字表示标准误; 同一栏内相同字母表示无显著差异, 不同字母表示有显著差异 (a=0.05); A、B、C 代表 0~20 cm 土层深度, a、b、c 代表 20~40 cm 土层深度, 、 、 代表 0~40 cm 平均值。

Note: Values in the brackets show the standard error; average means followed by the different letter in the same column are significantly different (a=0.05); A, B, and C stand for the soil depth of 0~20 cm, a, b and c stand for the soil depth of 20~40 cm, and , and stand for average contents of 0~40 cm soil depth.

表 3 三种林地土壤酶活性

Table 3 Soil Enzyme Activity in forest, conventional tea garden and ancient tea garden

林地类型 Tea Garden Type	采样深度 (cm) Soil Depth	脲酶 (mg/g) Urease	酸性磷酸酶 (mg/g) Acid Phosphatase	蔗糖酶 (mg/g) Saccharase	过氧化氢酶 (ml/g) Catalase
古茶园 (ATG)	0~20	2.217A(0.735)	15.10B(0.28)	3.446A(0.263)	4.18B(0.40)
	20~40	1.605a(0.474)	13.00b(0.20)	2.524ab(0.277)	3.77b(0.44)
	平均值	1.911 (0.720)	14.05 (1.15)	2.821 (0.800)	3.98 (0.44)
台地茶园 (CTG)	0~20	0.771B(0.051)	13.32C(0.89)	3.195A(0.575)	4.49B(0.18)
	20~40	0.703b(0.320)	11.93b(0.43)	2.298b(0.753)	4.04ab(0.53)
	平均值	0.737 (0.226)	12.63 (1.33)	2.471 (0.907)	4.26 (0.44)
天然林 (Forest)	0~20	1.771AB(0.960)	17.77A(0.35)	3.986A(0.660)	4.99A(0.12)
	20~40	0.965b(0.134)	16.08a(0.35)	3.388a(0.294)	4.62a(0.30)
	平均值	1.368 (0.827)	16.93 (0.98)	3.687 (0.563)	4.81 (0.29)

注：括号里数字表示标准误；同一栏内相同字母表示无显著差异，不同字母表示有显著差异（ $a=0.05$ ）；A、B、C代表0~20 cm土层深度，a、b、c代表20~40 cm土层深度，、、代表0~40 cm平均值。

Notes: Values in the brackets show the standard error; average means followed by the different letter in the same column are significantly different ($a=0.05$); A, B, and C stand for the soil depth of 0~20 cm, a, b and c stand for the soil depth of 20~40 cm, and , β and stand for average contents of 0~40 cm soil depth.

3.4 土壤养分各指标及土壤酶之间的相关性

从表 2 和表 4 可以看出,三种林地土壤 pH 差异并不大,与养分的相关性主要体现在金属元素上,与 Al、全 K 和 Mg 都具有显著相关性。氮元素与其他养分相关性最强,全 N 和碱解 N 与全 C、全 K、有效 K、Mg 和 Al 都具有显著或极显著相关性,全 C、Mg、Al 和全 K 与其他养分的相关性也很明显,全 N 和有机质的相关系数达到了 0.988,全 K 和 Mg 的相关系数达到了 0.942。全 N 和碱解 N、全 P 和有效 P 也具有极显著相关性,但全 K 和有效 K 却没有相关性。

除了 Ca 和 pH,其他养分与土壤酶的相关性都比较显著,尤其是 N、P、C、K 等主要的营养元素。酸性磷酸酶和土壤养分的相关性是最明显的,与全 N 和全 C 的相关系数达到了 0.907 和 0.900,而酸性磷酸酶与全 P 和有效 P 的相关系数仅有 0.434 和 0.446。采样时采集了一个龙山林的样地,因村民洒骨灰等原因该样地表层 0~20 cm 全 P 和有效磷分别达到了 1.57 g/kg 和 100.38 mg/kg,远高出其他样地,但酸性磷酸酶的活性反而比其他样地低,仅有 14.64 mg 酚/g·d,低于平均水平,进一步

说明了酸性磷酸酶的变化与全 P 和有效 P 的含量相关性不大,外源增加的磷负荷对土壤中的酸性磷酸酶无显著影响^[19,20]。脲酶主要是和 N 转化联系在一起的,但测定的结果显示在三种林地土壤中,脲酶与全 N 和碱解 N 都没有显著的相关性,与一些研究结果不一致^[21],这可能与茶树利用氮的特殊方式以及村民对茶园的管理有关系^[22]。除了全 K 和 Mg 与土壤酶活性呈负相关,其他成分与土壤酶都是正相关的。

4 结论

(1) 景迈古茶园区内土壤都呈明显的酸性,土壤 pH 在 3.80~3.91,但植茶依然使土壤继续酸化,古茶园因上百年的植茶历史酸化更明显。

(2) 土壤主要养分和酶活性都有明显的垂直分布,表层 0~20 cm 比下层 20~40 cm 高,但全 Mg、全 Al 和全 K 无此垂直分布。

(3) 古茶园的有机质、氮、磷和土壤酶活性均高于台地茶园,说明在土壤肥力上有着自我维持的明显优势。但因普洱茶日益增长的经济价值,古茶园受到的人为干扰越来越大,

对其土壤的破坏也会增加,如何可持续地利用和保护古茶园,让其土壤肥力得以维持从而保持茶叶的优良品质亟需得到重视。

(4) 氮元素与其它养分的相关性最强, pH 主要与金属元素显著相关, 土壤养分和酶活性相关性显著。但氮元素和脲酶活性无显著相关性, 可能原因在于茶树对氮元素利用的特殊方式, 磷元素和酸性磷酸酶活性相关系数不到 0.5, 外源增加的磷素对酸性磷酸酶的影响非常小。

致谢: 崔景云先生和叶先贡女士在采样上给予了支持和帮助; 土壤酶的分析 and 数据处理得到陈建会的指点; 王君在文章写作过程中提出了宝贵意见; 部分养分指标由西双版纳热带植物园昆明分部生物地球化学实验室分析, 在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 许玫, 王平盛, 唐一春, 等. 云南古茶树群落的分布和多样性[J]. 中国茶叶, 2005(6): 12~13.
- [2] 齐丹丹, 郭辉军, 崔景云, 等. 云南澜沧县景迈古茶园生态系统植物多样性评价[J]. 生物多样性, 2005, 13(3): 221~231.
- [3] 许玫, 王平盛, 唐一春, 等. 中国云南古茶树群落的分布与多样性[J]. 西南农业学报, 2006, 10(1): 123~126.
- [4] 陈红伟, 张俊, 王平盛, 等. 澜沧景迈古茶山考察与研究[J]. 茶叶通报, 2003, 25(3): 105~106.
- [5] 安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 等. 用典范相关性分析研究宁南宽谷丘陵区不同土地利用方式土壤酶活性与土壤肥力因子的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(15): 704~709.
- [6] 李跃林, 李志辉, 彭少麟, 等. 典范相关分析在校树人工林地土壤酶活性与营养元素关系研究中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 544~549.
- [7] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 7~11.
- [8] Wan FX, Chen P. Soil enzyme activities under Agroforestry systems in Northern Jiangsu Province [J]. Forestry Studies in China, 2004, 6(2): 21~26.
- [9] 国家林业局. 森林土壤分析方法(LY/T 1210~1275-1999) [M]. 北京: 标准出版社, 1999.
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [11] 哈兹耶夫. 土壤酶活性[M]. 郑元洪, 周礼凯, 张德生译. 北京: 科学出版社, 1980.
- [12] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [13] 李志佩. 亚热带茶园土壤的某些生物化学性状研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 162~170.
- [14] 王晓萍, 阮建云, 韩文炎, 等. 茶树钾营养特性的研究[J]. 作物学报, 1995, 21(3): 324~329.
- [15] 朱永兴, 陈福兴. 南方丘陵红壤茶园的镁营养[J]. 茶叶科学, 2000, 20(2): 95~100.
- [16] 韩文炎, 石元值, 马立峰. 茶园钾素研究进展与施钾技术[J]. 中国茶叶, 2004, 26(1): 22~24.
- [17] 沙丽清, 郭辉军. 云南古茶资源有效保护与合理利用. 见: 王如松主编. 循环、整合、和谐-第二届全国复合生态与循环经济学术讨论会论文集. 北京: 科技出版社, 2005: 362~365.
- [18] 张一平, 刘洋. 云南古茶园与常规茶园小气候特征比较研究[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(24): 17~24.
- [19] 沈有信, 周文君, 刘文耀, 等. 云南松根际与非根际磷酸酶活性与磷的有效性[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 91~93.
- [20] Wright AL, Reddy KR. Phosphorus loading effects on extracellular enzyme activity in everglades wetland soils[J]. Soil Science Society of America, 2001, 65: 588~595.
- [21] 高祥斌. 森林土壤化学性质与土壤酶活性典型相关分析[J]. 林业科技, 2007, 32(1): 11~13.
- [22] 俞慎卜, 何振立, 张荣光, 等. 红壤茶树根层土壤基础呼吸作用和酶活性[J]. 应用生态学, 2003, 14(2): 179~183.

表 4 土壤养分各指标及土壤酶之间的相关关系 (表中显示 Pearson 相关系数, n=22)
Table 4 Correlations between different soil properties and soil enzymes (Pearson coefficients were shown, n=22)

	pH	全 N Total N	碱解 N Alkaline Hydrolyzed N	全 P Total P	有效 P Available P	有机质 Organic Matter	全钾 Total K	有效 K Available K	全 Mg Total Mg	全 Ca Total Ca	全 Al Total Al	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Saccharase	
pH	1															
全 N Total N	0.340	1														
碱解 N Alkaline Hydrolyzed N	0.046	0.828**	1													
全 P Total P	-0.064	0.337	0.308	1												
有效 P Available P	-0.174	0.450*	0.378	0.592**	1											
有机质 Organic Matter	0.365	0.988**	0.789**	0.266	0.361	1										
全钾 Total K	-0.513*	-0.808**	-0.615**	-0.125	-0.047	-0.855**	1									
有效 K Available K	0.375	0.469*	0.521*	0.124	0.250	0.401	-0.223	1								
全 Mg Total Mg	-0.484*	-0.745**	-0.575**	0.028	-0.028	-0.801**	0.942**	-0.232	1							
全 Ca Total Ca	0.288	0.169	0.255	0.050	0.094	0.095	0.006	0.840**	0.052	1						
全 Al Total Al	0.425*	0.451*	0.417	0.394	-0.097	0.477*	-0.696**	0.182	-0.591**	0.011	1					
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.285	0.907**	0.766**	0.434*	0.446*	0.900**	-0.741**	0.291	-0.708**	-0.077	0.475*	1				
脲酶 Urease	-0.192	0.336	0.242	0.809**	0.702**	0.264	-0.052	-0.028	0.014	-0.079	0.072	0.427*	1			
过氧化氢酶 Catalase	0.445*	0.673**	0.555**	-0.140	0.135	0.679**	-0.525*	0.503*	-0.598**	0.198	0.153	0.662**	-0.093	1		
蔗糖酶 Saccharase	0.026	0.714**	0.730**	0.442*	0.366	0.670**	-0.457*	0.513*	-0.355	0.331	0.313	0.713**	0.383	0.458*	1	

* 表示在 0.05 水平(两尾测验)上显著; ** 表示在 0.01 水平(两尾测验)上显著。
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).