

## 海南岛典型农用地土壤综合肥力评价

邓星亮<sup>1,2</sup>, 杨安富<sup>2</sup>, 杨 丽<sup>2</sup>, 孟龙威<sup>2</sup>, 袁漫遥<sup>1</sup>, 陈俊男<sup>1,2</sup>, 吴晓晨<sup>2\*</sup>

1. 海南大学生态与环境学院, 海南海口 570228; 2. 海南省环境科学研究院, 海南海口 571126

**摘要:** 为研究海南岛典型农用地土壤肥力情况, 对海南省林地、耕地、园地和草地用地类型下的土壤 pH、机械组成、有机质、阳离子交换量、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾进行测定及统计分析, 参考《全国第二次土壤普查养分分级标准》, 采用内梅罗 (Nemerow) 指数法对各用地类型进行土壤综合肥力评价。结果表明: 不同用地类型中, 氮素含量均表现为缺乏水平; 磷素含量均表现为丰富或很丰富水平; 而钾素含量在林地和耕地中为丰富水平, 在园地中属于中等水平, 在草地中表现为缺乏水平。在 4 种不同农用地类型中, 土壤有机质与阳离子交换量、全氮、碱解氮均呈显著相关 ( $P<0.05$ ) 或极显著相关 ( $P<0.01$ ), 土壤阳离子交换量与全氮、碱解氮也呈较强的相关性, 其他土壤养分之间几乎无相关性或相关性较弱。而 4 种不同农用地类型的土壤综合肥力值依次为园地(1.164)>林地(1.058)>耕地(0.879)>草地(0.784), 其中园地和林地的土壤综合肥力水平均属于一般, 而耕地和草地属于贫瘠。因此, 应该加强土地管理, 合理利用土地, 改善土壤养分结构, 最终提高土地生产力。

**关键词:** 用地类型; 土壤肥力; 土壤养分; 内梅罗指数法

中图分类号: S158.3 文献标识码: A

## Soil Nutrient Analysis and Comprehensive Fertility Evaluation of Four Types of Agricultural Land in Hainan Island

DENG Xingliang<sup>1,2</sup>, YANG Anfu<sup>2</sup>, YANG Li<sup>2</sup>, MENG Longwei<sup>2</sup>, YUAN Manyao<sup>1</sup>, CHEN Junnan<sup>1,2</sup>, WU Xiaochen<sup>2\*</sup>

1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Academy of Environmental Sciences, Haikou, Hainan 571126, China

**Abstract:** For the study of Hainan Island typical farmland soil fertility conditions, the forest land, cultivated land, garden land and grass land of Hainan, China under the type of soil pH, mechanical composition, organic matter, cation exchange capacity, total nitrogen, alkali solution nitrogen, total phosphorus, effective phosphorus, total potassium were determined and statistically analyzed. Based on “the second soil census nutrient classification standard”, the Nemerow Index Method was used to evaluate the comprehensive soil fertility of each land use type. The results showed that nitrogen content was deficient in different land use types. The phosphorus content was abundant or very abundant. Potassium content was abundant in woodland and cultivated land, moderate in garden land, and deficient in grassland. In the four types of farmland, and cation exchange capacity of soil organic matter, total nitrogen, hydrolyze nitrogen were significantly correlated ( $P<0.05$ ) or extremely significant correlation ( $P<0.01$ ), soil cation exchange capacity and total nitrogen and hydrolysis nitrogen showed strong correlation, and other soil nutrient showed virtually no correlation or weak correlation. The corresponding comprehensive soil fertility of the four land types was in the order of garden land (1.164)>forest land (1.058)>arable land (0.879)>grassland (0.784). The comprehensive soil fertility of garden land and forest land was average, while that of arable land and grassland was poor. Therefore, we should strengthen land management, rational use of land, improve soil nutrient structure, and finally improve land productivity.

**Keywords:** land type; soil fertility; soil nutrient; Nemerow index method

收稿日期 2022-08-31; 修回日期 2022-10-18

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 2019RC355)。

作者简介 邓星亮 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 资源利用与植物保护。\*通信作者 (Corresponding author): 吴晓晨 (WU Xiaochen), E-mail: graywoo@163.com。

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.07.021

近年来, 由于人口的增加以及社会经济的迅速发展, 农业越发被人们所关注。而土壤是农业发展的根本, 养分又是土壤生产力的基础, 因此养分含量的高低是衡量土壤质量的重要指标<sup>[1]</sup>, 土壤养分对于农业的发展尤为重要。同时水土流失、过度施肥等问题也会使土壤肥力严重下降。因此, 关于土地利用方式的研究成为当今环境问题的重要内容之一<sup>[2-3]</sup>。人为活动以及用地方式的不同均会对土壤性质产生一系列的影响, 而土壤的用地类型会直接影响土壤中 C、N、P 之间的比值, 进而影响土壤质量<sup>[4-5]</sup>。海南省不同土地利用类型的发展速度和土壤肥力也具有一定差异, 为了能更好地对热带地区不同农用地土壤进行评价, 本研究对林地、园地、草地和耕地 4 类主要用地类型进行探究。据海南省 2021 年统计数据显示, 全省耕地面积 72.3 万  $\text{hm}^2$ , 园地面积 91.6 万  $\text{hm}^2$ , 林地面积 119.8 万  $\text{hm}^2$ , 草地面积 4.6 万  $\text{hm}^2$ 。其中占地面积最多的园地和林地对于海南省而言尤为重要, 园地所种植的水果是海南省主要经济收入之一; 林地是森林的载体, 是野生动植物以及微生物能量循环转换和物质循环的必要环境条件; 耕地是农产品的基础, 其土壤的质量直接关系到人们的生活以及经济收入; 草地在生态环境中不仅具有调节气候、保持水分的作用, 还能够防风固土固沙、保持水土等。有研究提出, 合理利用土地能够通过改善土壤肥力、改良土壤结构等方面来抑制土壤退化, 提高土壤质量<sup>[6-7]</sup>。而不合理利用土地, 会造成土壤性质的变化以及土壤养分的流失, 从而导致土壤肥力的下降<sup>[8]</sup>。本研究通过对海南省不同类型土壤肥力进行调查与分析, 以结合实际情况调整肥料施用方案, 改善土壤养分结构, 为海南省农业的健康发展奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

海南岛位于我国最南端, 陆地总面积达 3.5191 万  $\text{km}^2$ , 海域面积达 200 万  $\text{km}^2$ <sup>[9]</sup>, 地处 3°58'~20°10'N, 108°37'~117°50'E, 气候适宜、四季常青, 森林覆盖率超过 50%。地形以台地、阶地以及平原为主, 而地势主要表现为四周低平、中间高耸。在气候方面, 由于海南岛地处热带北缘, 年平均气温在 22.5~25.6  $^{\circ}\text{C}$  之间, 是热带海洋

和热带季风混合型气候。同时海南岛的降水量分配不均, 有明显的多雨季和少雨季, 且少雨季经常伴有干旱现象发生, 年降水量为 1500~2500 mm。由于独特的环境条件, 海南岛的土壤类型丰富, 可划分为 15 个土类、27 个亚类以及 81 个土属<sup>[10]</sup>。其中海南省的主要土壤类型为砖红壤, 约占岛内土地总面积的 53.42%, 同时海南省的主要耕作土壤为水稻土<sup>[11]</sup>。海南省的农用地面积为 282.64 万  $\text{hm}^2$ , 占土地总面积的 79.95%, 已开发利用的土地 331.59 万  $\text{hm}^2$ , 未开发利用的土地 20.32 万  $\text{hm}^2$ <sup>[12]</sup>。因此, 海南省的用地类型以农用地为主。本研究选取涵盖海南省 18 个市(县)的 51 个采样点, 包含耕地、草地、林地以及园地, 基本情况见表 1。

表 1 不同用地类型基本情况  
Tab. 1 Basic information of different land use types

类型 Type	面积 Area/( $\times 10^4 \text{ hm}^2$ )	占土地总面积比例 Percentage of total land area/%	样点数 Sample number
林地	119.8	34.1	30
园地	91.6	26.0	9
耕地	72.3	20.5	9
草地	4.6	1.3	3

### 1.2 点位布设和样品采集

土样采集时间为 2020 年 10 月至 2021 年 1 月, 在综合考虑海南省植被、土壤类型以及用地类型等因素的基础上, 按照统计学要求科学合理布设采样点的数量和密度。其中包括林地 30 个, 园地 9 个, 耕地 9 个, 草地 3 个, 同时, 采样点位避开有人工施肥的种植区域, 避免人为因素对土壤有机质等养分指标含量的影响。其具体分布位置以及相应的用地类型如图 1 所示。在相应点位, 找到可以表示附近土壤类型的点, 以该点为中心, 100 m 为半径, 确定采样区域, 通过蛇形、对角线等采样方法平均采集样品并混匀, 再采用四分法取约 2 kg 土样, 分别贴上标签, 带回实验室风干。风干后, 通过三头研磨机将土样分别进行研磨, 按照不同指标要求过筛, 供室内分析。

### 1.3 指标测定

土壤肥力指标的选择参照文献<sup>[13]</sup>, 包括 pH、有机质、阳离子交换量、土壤质地、全氮、全磷、全钾、有效磷以及碱解氮 9 个指标, 其中各养分指标的测定方法及其具体步骤严格按照《森林土

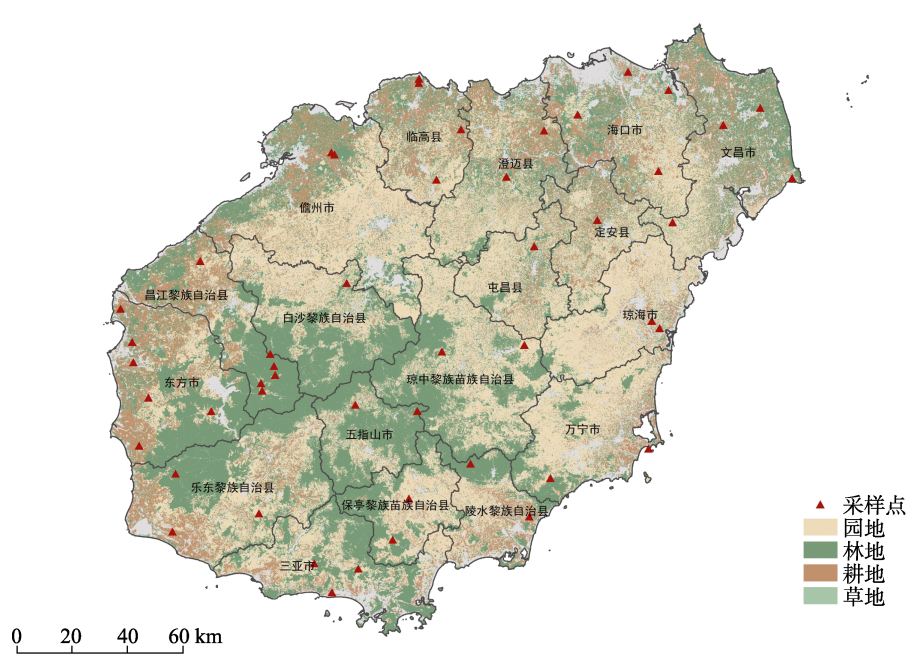


图 1 采样点位及用地类型

Fig. 1 Sampling point location and land use type

壤分析方法》<sup>[14]</sup>进行。

### 1.4 指标标准化及肥力计算

标准化处理后土壤肥力指标的分级标准参照文献[15-16]可得，所选评价指标包括 pH、土壤质地、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、碱解氮以及阳离子交换量。由于所选指标的量纲之间具有差异性，因此各指标之间不能进行加和，所以要对各指标参数进行标准化处理，以便于相互之间的综合计算。具体处理方法<sup>[17]</sup>如下：

当指标的测定值 ( $C_i$ ) 属于“极差”级时，即  $C_i \leq X_a$ ,  $P_i = C_i / X_a$  ( $P_i \leq 1$ )；当指标的测定值属于“差”级时，即  $X_a < C_i \leq X_c$ ,  $P_i = 1 + (C_i - X_a) / (X_c - X_a)$  ( $1 < P_i \leq 2$ )；当指标的测定值属于“中等”级时，即  $X_c < C_i \leq X_p$ ,  $P_i = 2 + (C_i - X_c) / (X_p - X_c)$  ( $2 < P_i < 3$ )；当指标的测定值属于“良好”级时，即  $C_i > X_p$ ,  $P_i = 3$ 。式中， $C_i$  为指标的测定值； $P_i$  为分肥力系数； $X$  为指标分级标准 (表 2)，其中  $X_a$ 、 $X_c$  和  $X_p$  分别为“差”级、“中等”级和“良好”级分级标准。通过标准化之后，使同级别的各指标分肥力系数比较接近，可比性更高，便于对比分析。

土壤质地并非是量化参数 (美国制)，其分级标准以及标准化的结果为：(1) 壤土类。砂质壤土、壤土、粉 (砂) 质壤土， $P_i = 3$ 。(2) 黏壤土类。砂质黏壤土、黏壤土、粉 (砂) 质黏壤土、粉土， $P_i = 2$ 。(3) 砂土类。砂土、壤质砂土；粘

表 2 土壤指标的分级标准值

Tab. 2 Classification standard values of soil indicators

指标 Index	$X_a$	$X_c$	$X_p$
有机质/( $g \cdot kg^{-1}$ )	10.00	20.00	30.00
全氮/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.75	1.50	2.00
全磷/( $g \cdot kg^{-1}$ )	0.40	0.60	0.80
全钾/( $g \cdot kg^{-1}$ )	5.00	20.00	25.00
有效磷/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	5.00	10.00	20.00
碱解氮/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	60.00	120.00	180.00
阳离子交换量/( $cmol \cdot kg^{-1}$ )	5.00	10.00	15.00
pH ( $\leq 7$ )	4.50	5.50	6.50
pH ( $> 7$ )	9.00	8.00	7.00

土类。砂质黏土、壤质黏土、粉砂质黏土、黏土、重黏土，分肥力系数  $P_i = 1$ <sup>[18]</sup>。

综合肥力系数的计算方法有加和法、平均值法等，但是这些方法均受主观因素的影响，且可比性较差，因此本研究采用修正后较为客观的内梅罗 (Nemerow) 公式来计算综合肥力系数：

$$Q = \sqrt{\frac{(P_{i\text{平均}})^2 + (P_{i\text{最小}})^2}{2} \cdot \frac{n-1}{n}}$$

式中， $Q$  为土壤综合肥力系数， $P_{i\text{平均}}$  为土壤各属性分肥力系数的平均值， $P_{i\text{最小}}$  为各分肥力系数中的最小值， $n$  为参与评价的指标个数。公式中用  $P_{i\text{最小}}$  代替了原内梅罗公式中的  $P_{i\text{最大}}$ ，能够更加突出土壤属性中最差因子对肥力的影响，从而明确

土壤肥力的限制因子,反映出作物生长的最小因子率。同时还增加了修正项 $(n-1)/n$ 来反映评价的可信度,其中参与土壤肥力评价的属性种类越多,其值越大,可信度越强,增加了评价参数不相等时评价结果的可比性。通过计算,最终得到土壤综合肥力系数,进而作出肥力评价。

土壤综合肥力系数分级标准将土壤质量分为 4 个等级,分别是很肥沃( $Q \geq 2.7$ )、肥沃( $2.7 > Q \geq 1.8$ )、一般( $1.8 > Q \geq 0.9$ )以及贫瘠( $0.9 > Q$ )<sup>[19]</sup>。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2019、Origin 2022 以及 SPSS 26.0 软件(Pearson's 相关显著性检验)进行实验数据的处理,运用 ArcMap 10.3 软件对采样点的分布进行作图,采用修正后的内梅罗指数评价法对海南省主要农用地类型进行土壤肥力综合评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分指标分析

2.1.1 土壤质地和 pH 土壤质地是土壤肥力的重要指标之一,它能够通过影响土壤的通气性、透水性、保水保肥性等,进而影响土壤性状以及耕地性状。根据检测结果可知,不同的土地利用类型,其土壤质地的质量等级有明显差异,其分级标准如 1.4 中所述。如图 2 所示,林地、园地、耕地、草地中的土壤质地依次逐渐变差,林地和园地的土壤质地为良好的约占总体的二分之一,而草地的土壤质地均为差等级。

同时,土壤 pH 通过影响土壤养分的转化、释放以及有效性而直接影响植物的正常生长,是土壤肥力的重要影响因子之一。通过检测可知,

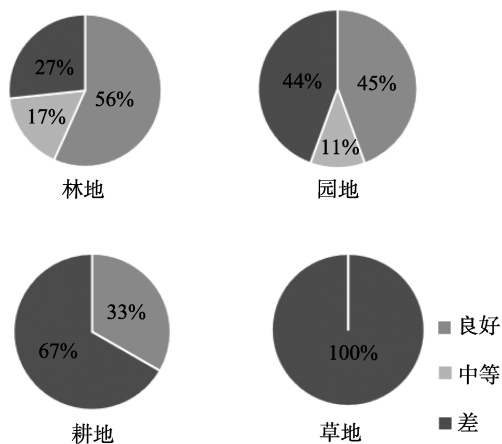


图 2 各用地类型不同土壤质地占比  
Fig. 2 Proportions of different soil textures in different land use types

林地、耕地、园地以及草地的 pH 平均值分别为 5.035、5.509、5.758、5.410,均呈酸性或弱酸性(表 3)。而当 pH 在 6.5~7.5 之间时,土壤中含有的植物生长所需养分的有效性最高,有利于植物吸收利用,过高或者过低均不利于植物生长。通过对比土壤养分含量分级标准可知,林地和草地的酸碱等级为差等,而耕地和园地的 pH 等级则为中等。

2.1.2 土壤有机质和阳离子交换量 土壤有机质是土壤肥力的基础,它不但是土壤养分的直接来源,同时还具有改善土壤性质、改良土壤结构、提升土壤性能等多重作用,对土壤肥力的衡量有至关重要的作用。从检测结果可看出(表 3),耕地土壤中的平均有机质含量最低,为 12.123 g/kg,其原因可能是频繁的耕作条件破坏了土壤结构,使土壤中的有机质分解得更快<sup>[20]</sup>。其次是草地和园地,分别为 15.487、27.658 g/kg,而林地土壤的有机质平均含量最高,为 30.444 g/kg,可能是树枝、枯叶等凋落物增加了土壤养分的输入,进而促使有机质含量不断增加<sup>[21]</sup>。根据肥力指数分级指标可得到,林地和园地的土壤有机质含量属于中等水平,而耕地和草地的土壤有机质含量属于差等水平。

阳离子交换量(CEC)是指土壤胶体能够吸附的阳离子的总量,其数值的大小可以反映土壤保肥能力的强弱,CEC 越大,表示土壤的保肥能力越强。在农业上一般认为 CEC<10 cmol/kg 时保肥能力弱,在 10~20 cmol/kg 时保肥能力中等,CEC>20 cmol/kg 时保肥能力强<sup>[22]</sup>。因此,土壤 CEC 也是影响土壤肥力的重要因素。通过检测结果可知,4 种用地类型中土壤阳离子交换量均处于较低水平,园地中的平均值最高,达到了 11.367 cmol/kg,而林地、耕地和草地的平均值较低,分别为 8.360、2.967、2.033 cmol/kg(表 3)。由肥力指数分级指标可知,林地和园地 CEC 的平均水平属于差等,而耕地和草地则属于极差等。但是土壤有机质与阳离子交换量 2 种指标之间基本上满足有机质含量越高,土壤中阳离子交换量越大的规律(图 3)。

2.1.3 土壤氮素 氮既是植物生长所必需的营养元素,又作为养分限制因子在农业生产中发挥重要作用。在土壤中的氮可分为无机态氮和有机态氮,而有机氮占全氮的 92%~98%,然而随着土壤深度的不断加深,其所占的比值也越来越小。因

表 3 各用地类型土壤肥力指标统计  
Tab. 3 Statistics of soil fertility indicators of various land types

类型 Type	指标 Index	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	综合肥力系数 Q
林地	pH	8.600	3.820	5.035	0.906	0.180	1.058
	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	176.000	1.690	30.444	31.489	1.034	
	CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	37.100	0.400	8.360	6.744	0.807	
	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.481	0.007	0.137	0.095	0.693	
	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	309.000	10.000	111.600	65.449	0.586	
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.018	0.032	0.409	0.436	1.066	
	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	89.060	15.340	22.778	13.082	0.574	
	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	52.936	0.638	21.525	16.165	0.751	
耕地	pH	6.850	4.210	5.509	0.856	0.155	0.879
	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	39.100	1.980	12.123	10.400	0.858	
	CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	6.700	0.500	2.967	2.603	0.877	
	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.192	0.029	0.067	0.048	0.716	
	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	129.000	27.000	56.111	29.019	0.517	
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.585	0.153	0.359	0.169	0.471	
	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	128.880	19.920	54.827	32.054	0.585	
	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	44.882	0.390	20.522	14.187	0.691	
园地	pH	6.600	4.710	5.758	0.580	0.101	1.164
	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	49.000	4.900	27.658	14.895	0.539	
	CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	33.500	3.200	11.367	8.954	0.788	
	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.229	0.030	0.139	0.060	0.432	
	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	215.000	25.000	118.444	52.808	0.446	
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.661	0.096	0.909	0.997	1.097	
	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	154.680	17.270	35.392	42.265	1.194	
	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	41.813	1.306	17.678	12.477	0.706	
草地	pH	6.000	4.760	5.410	0.590	0.109	0.784
	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	24.400	8.960	15.487	6.525	0.421	
	CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	2.500	1.200	2.033	0.591	0.291	
	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.117	0.038	0.076	0.032	0.421	
	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	66.000	36.000	47.333	30.415	0.643	
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.567	0.112	0.947	1.146	1.210	
	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	304.900	20.180	115.017	133.695	1.173	
	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	29.100	0.863	10.604	13.085	1.234	

此，一般情况下，在施肥中采用土壤全氮和碱解氮作为土壤供氮能力的评估指标<sup>[23]</sup>。通过检测可以发现，4种用地类型中全氮以及碱解氮的平均含量均极低，其中林地中土壤全氮含量为 0.007~0.481 g/kg，耕地全氮含量为 0.029~0.192 g/kg，园地的为 0.030~0.229 g/kg，草地的为 0.038~0.117 g/kg（表 3）。相应地，碱解氮也基本上符合“全氮含量高碱解氮的含量也高，全氮含量低碱解氮的含量也低”的规律。对比土壤养分含量分级标准可知，各用地类型的全氮含量均处于极缺乏的情况，而林地和

园地的碱解氮含量均处于中等水平，耕地和草地的碱解氮含量则处于很缺乏的情况。

2.1.4 土壤磷素 磷不仅是人和动物用来合成核酸的重要元素之一，也是作物所需的必需元素，是农业生产中重要的养分限制因子。土壤中的磷素含量在一定程度上可以反映土壤对磷的储存能力以及供应能力<sup>[23]</sup>，然而，土壤中的磷含量或高或低均会影响土壤肥力以及周边环境，其含量的高低主要取决于成土母质以及施肥量，通常将有效磷作为土壤磷素供应水平的指标。通过检测结

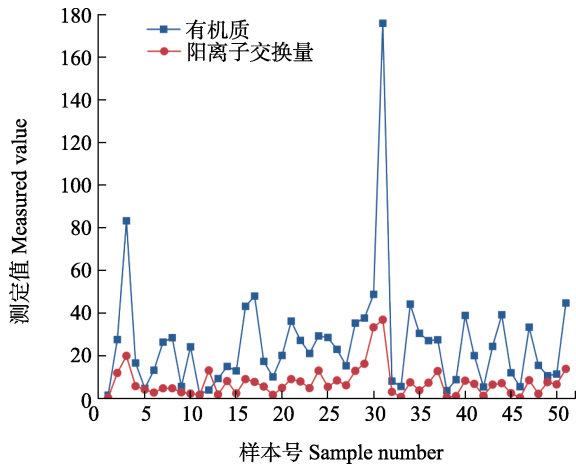


图 3 有机质与阳离子交换量趋势图

Fig. 3 Trend diagram of organic matter and cation exchange capacity

果可知, 全磷的平均含量在草地和园地中均处于丰富等级, 分别为 0.947、0.909 g/kg, 而在林地和耕地中均属于缺乏等级, 分别为 0.409、0.359 g/kg (表 3)。有效磷的平均含量在 4 种用地类型中均处于丰富或很丰富等级。根据计算各点测定值的肥力系数可以看出, 4 种用地类型中全磷的平均分肥力等级均处于差等, 而林地、耕地以及园地有效磷的平均分肥力等级均属于中等, 草地的则为良好。根据检测结果可以看出, 草地的磷素含量最高, 林地的磷素含量则较低, 可能是由于林地中随着年限的增加, 树木不断生长而导致土壤中磷素“入不敷出”的状况。

**2.1.5 土壤钾素** 钾作为作物生长的必需营养元素, 参与作物几乎所有的生理过程, 因此作物对钾的需求量也相对较高。而土壤中钾含量的高低主要与母质、成土条件、质地以及施肥量等因素有关。根据测定结果可知, 林地的全钾含量在 0.638~52.936 g/kg 之间, 耕地的全钾含量为 0.390~44.882 g/kg, 园地的为 1.306~41.813 g/kg, 草地的为 0.863~29.100 g/kg (表 3)。由土壤养分含量分级标准可知, 林地和耕地的平均含量分别为 21.525、20.522 g/kg, 均属于丰富等级; 园地的平均含量为 17.678 g/kg, 属于中等级别; 而草地的平均含量为 10.604 g/kg, 属于缺乏等级。

## 2.2 不同用地类型土壤肥力指标的相关性分析

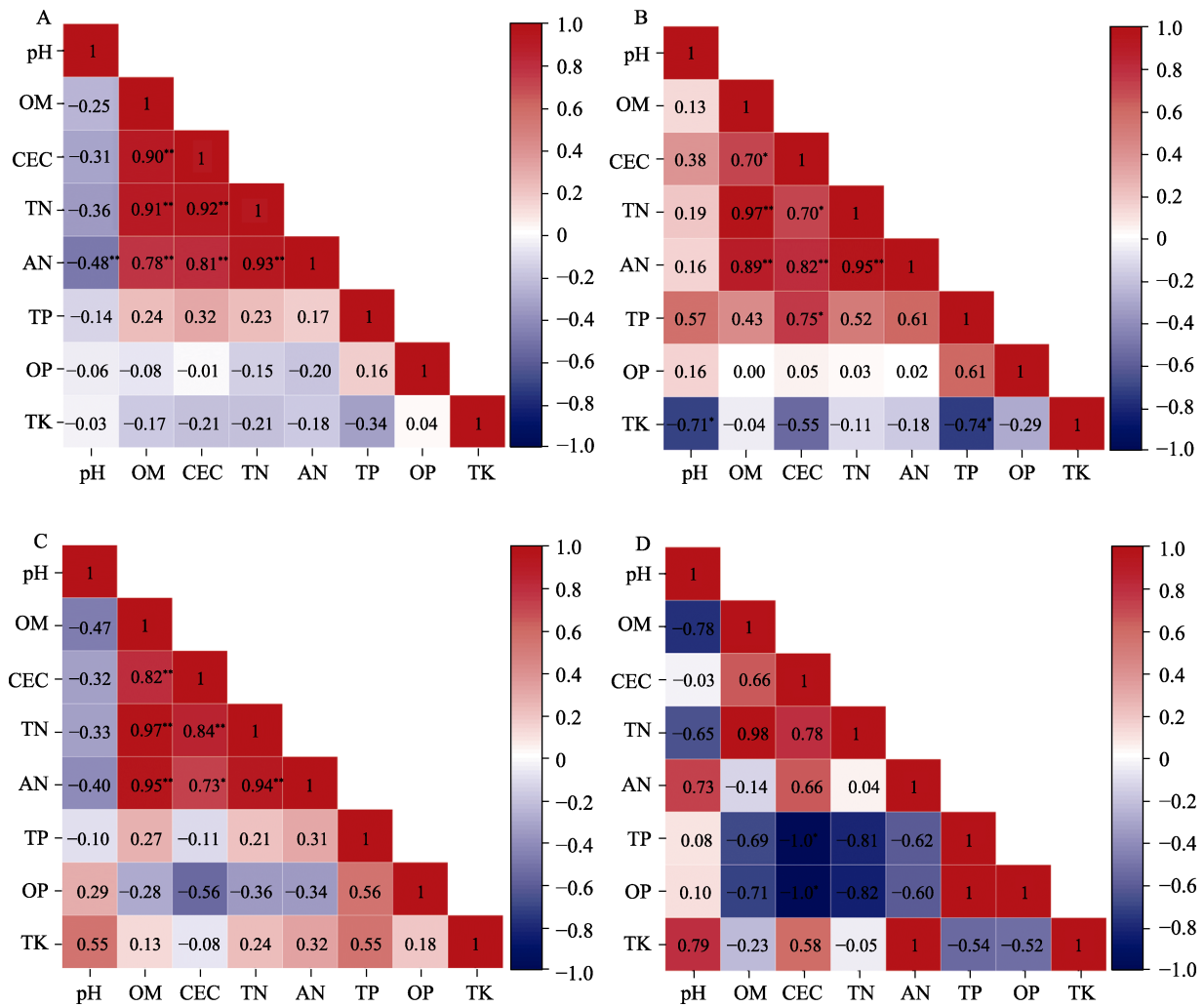
为了更好地了解不同农用地类型中各土壤养分之间的相互关系, 对指标进行 Pearson's 相关性分析 (图 4)。在林地中, 土壤 pH 与碱解氮 (AN) 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤有机质 (OM)

与阳离子交换量 (CEC)、全氮 (TN)、碱解氮均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤阳离子交换量与全氮、碱解氮均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤全氮与碱解氮呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤 pH 与碱解氮呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 而耕地中土壤养分的相关性与林地相似, 但阳离子交换量与碱解氮呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 在园地中, 土壤 pH 与全钾 (AK) 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 土壤有机质与阳离子交换量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与全氮、碱解氮呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤阳离子交换量与全氮、全磷 (TP) 均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与碱解氮呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤全氮与碱解氮呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤全磷与全钾呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 而在草地中, 土壤阳离子交换量与全磷、有效磷 (OP) 均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 全磷与有效磷呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

通过相关性分析发现, 在不同农用地类型中, 有机质与阳离子交换量、全氮、碱解氮呈显著或极显著相关, 阳离子交换量与全氮、碱解氮呈显著或极显著相关, 这与杨义波等<sup>[24]</sup>的研究结果基本一致。说明有机质和阳离子交换量在土壤肥力中具有极其重要的作用, 且与氮素含量息息相关。全氮含量与碱解氮含量之间呈极显著相关, 说明它们具有明显的同源性。而在草地中各土壤养分的相关性低于其他 3 种用地类型, 可能是因为本研究中的草地点位较少, 因此, 今后应加强完善草地的土壤养分相关性研究。

## 2.3 土壤综合肥力分析

根据土壤综合肥力评价结果可知, 所调查的 51 个地点的土壤综合肥力指数 ( $Q$ ) 变幅在 0.508~1.546 之间, 平均值为 1.029, 土壤的总体肥力水平为一般, 不同用地类型的土壤综合肥力有差异。根据不同土壤综合肥力指数来评价土壤的肥力水平, 将土壤综合肥力指数划分等级 (表 3), 4 种不同用地类型的土壤综合肥力指数的均值为园地 (1.164) > 林地 (1.058) > 耕地 (0.879) > 草地 (0.784), 其中园地和林地的土壤综合肥力水平均属于一般, 耕地和草地的土壤综合肥力水平属于贫瘠。而分肥力系数中的最小值是影响土壤肥力指数的重要因子, 根据计算结果可以得出, 在所有采样点中, 以全氮作为最小分肥力系数的占总体的 88.24%, 而以全磷和全钾作为最小分肥力系数的占总体的 5.88%, 因此全氮是影响海南岛 4



A: 林地; B: 园地; C: 耕地; D: 草地。\*表示显著相关 ( $P < 0.05$ ) ; \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ ) 。  
 A: Forest land; B: Garden land; C: Cultivated land; D: Grass land. \* means significant correlation ( $P < 0.05$ ); \*\* means extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

图 4 不同农用地类型养分指标的相关性

Fig. 4 Correlation between nutrient indicators of different types of agricultural land

种不同用地类型中土壤肥力的主要因素，是土壤肥力的主要限制因子。

### 3 讨论

不同的土地利用类型会对土壤性质产生不同的影响，而不合理的土地利用方式进一步加剧了土壤生态环境的破坏<sup>[25]</sup>。土壤肥力调查及评价是对土壤进行合理利用的重要依据，通过本次调查发现，海南省 4 种农用地类型的土壤状况有差异。4 种农用地中，pH 均呈现酸性或弱酸性，有研究表明，海南省园地、林地等<sup>[26-27]</sup>土壤均呈酸化趋势，同时这也与海南省独特的气候及土壤类型有关；有机质含量的差别较大，其中林地和园地的有机质含量较高，主要是由于树枝、树叶等凋落物增加了土壤中有机质的输入，而耕地中有机质

的缺乏主要是由于频繁的耕作条件使土壤条件被破坏，进一步加速了有机质的分解<sup>[19, 28]</sup>；对于氮、磷、钾 3 种营养物而言，氮素的平均含量均较低，这与曹明等<sup>[28-30]</sup>等相关研究结果一致，磷素在园地中含量丰富的主要原因可能是由于全国第 2 次土壤普查之前大部分土壤处于缺磷状态，使果农施用大量的磷肥来增加产量，而在林地和耕地中含量缺乏，则可能是由于树木不断生长、农作物的大量吸收导致土壤中磷素“入不敷出”的现象，钾素在林地、耕地和园地中含量均较丰富，这与吴小芳等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。

在 4 种不同农用地利用方式下，土壤养分中的有机质与阳离子交换量、全氮、碱解氮呈显著或极显著相关，阳离子交换量与全氮、碱解氮呈显著或极显著相关，同源氮素之间呈极显著相关，

其他土壤养分之间无相关性或相关性较弱。通过内梅罗指数法计算综合肥力指数可知, 4 种用地类型土壤综合肥力值的大小顺序依次为园地 (1.164) > 林地 (1.058) > 耕地 (0.879) > 草地 (0.784), 其中园地和林地的土壤综合肥力均属于一般水平, 而耕地和草地的土壤综合肥力属于贫瘠水平。通过分析土壤综合肥力值可知, 4 种不同用地类型中土壤肥力的限制因子主要是氮素, 全氮含量成为土壤属性的最差因子, 而有效磷含量的分肥力系数最大, 所以有效磷对 4 种用地类型中的土壤肥力贡献最大。

综上所述, 在不同的农用地类型中, 其土壤养分含量有差异, 总体表现为氮素较缺乏, 磷素均表现为丰富或很丰富水平; 而钾素在林地和耕地中为丰富水平, 在园地中属于中等水平, 在草地中表现为缺乏水平。同时土壤肥力水平主要为一般和贫瘠, 因此, 今后对于海南省 4 种不同农用地类型的使用与管理上, 应多施用碱性化肥, 增加氮肥、磷肥的施用, 在耕地中加大有机肥的投入, 因地制宜, 制定合理的用地计划, 合理施肥提高土壤养分含量, 从而提高生产力。

## 参考文献

- [1] 万盼, 胡艳波, 张弓乔, 王宏翔, 李录林, 王鹏, 惠刚盈. 2 种不同土地利用方式对山麓耕地土壤养分的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(1): 8-14, 19.  
WAN P, HU Y B, ZHANG G Q, WANG H X, LI L L, WANG P, HUI G Y. Effects of two different land use patterns on soil nutrients in foothill cultivated land[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2019, 39(1): 8-14, 19. (in Chinese)
- [2] QIAN L X, CUI H S. Impacts of land use and cover change on land surface temperature in the Zhujiang Delta[J]. Pedosphere, 2006 (6): 681-689.
- [3] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996(6): 553-558.  
LI X B. International research trends of land use/land cover change: the core field of global environmental change research[J]. Acta Geographica Sinica, 1996(6): 553-558. (in Chinese)
- [4] KANNAN I, WEI S. Soil enzyme activities in two forage systems following application of different rates of swine lagoon effluent or ammonium nitrate[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 38(2): 128-136.
- [5] LIU M, LI Z P, ZHANG T L. Changes of soil ecological stoichiometric ratios under different land uses in a small catchment of subtropical China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2016, 66(1): 67-74.
- [6] 李生, 任华东, 姚小华. 土地利用方式对桂西北石漠化地区土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 58-62, 190.  
LI S, REN H D, YAO X H. Land use means the influence of soil physical and chemical properties of rocky desertification area northwest Guangxi[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 58-62, 190. (in Chinese)
- [7] 谢瑾, 李朝丽, 李永梅, 郭芳芳. 纳板河流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3169-3176.  
XIE J, LI C L, LI Y M, GUO F F. Soil quality assessment of different land use types in the napan river basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3169-3176. (in Chinese)
- [8] 王雪梅, 柴仲平, 杨雪峰. 荒漠绿洲区不同土地利用方式下土壤养分差异分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 91-96.  
WANG X M, CHAI Z P, YANG X F. Analysis of soil nutrients under different land use patterns in desert oasis region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 91-96. (in Chinese)
- [9] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
Hainan Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of National Bureau Statistics in Hainan. Hainan statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. (in Chinese)
- [10] 张冬明, 张永发, 吴鹏飞, 漆智平. 海南岛土壤养分质量综合评价[J]. 热带作物学报, 2009, 30(9): 1286-1290.  
ZHANG D M, ZHANG Y F, WU P F, QI Z P. Comprehensive evaluation of soil nutrient quality in Hainan Island[J]. Journal of Tropical Crops, 2009, 30(9): 1286-1290. (in Chinese)
- [11] 傅杨荣. 海南岛土壤地球化学与优质农业研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.  
FU Y R. Soil geochemistry and high quality agriculture in Hainan Island[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [12] 海南省人民政府. 海南年鉴[M]. 海口: 海南年鉴社, 2021.  
People's Government of Hainan Province. Hainan Yearbook[M]. Haikou: Hainan Yearbook Press, 2021. (in Chinese)
- [13] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006(3): 901-913.  
LIU Z F, FU B J, LIU G H, ZHU Y G. Soil quality and soil quality indicators and their evaluation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(3): 901-913. (in Chinese)
- [14] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
ZHANG W R. Analysis method of forest soil[M]. Beijing:

- Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [15] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 张久东, 卢秉林, 杨蕊菊. 甘肃省武山县土壤养分特征及综合肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 347-353.  
WU K S, CHE Z X, BAO X G, ZHANG J D, LU B L, YANG R J. Soil nutrient characteristics and comprehensive fertility evaluation in Wushan county, Gansu province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(3): 347-353. (in Chinese)
- [16] 张冬明, 谢良商, 张文, 郑道君, 潘孝忠, 曾建华. 海南主要油茶林土壤肥力调查与评价[J]. 经济林研究, 2015, 33(1): 79-85.  
ZHANG D M, XIE L S, ZHANG W, ZHENG D J, PAN X Z, ZENG J H. Investigation and evaluation of soil fertility of main *Camellia oleifera* forests in Hainan province[J]. Economic Forest Research, 2015, 33(1): 79-85. (in Chinese)
- [17] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994(6): 245-247.  
KAN W J, WU Q T. A method for quantitative and comprehensive evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994(6): 245-247. (in Chinese)
- [18] 单奇华, 俞元春, 张建锋, 钱洪涛, 徐永辉. 城市森林土壤肥力质量综合评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 186-190, 223.  
SHAN Q H, YU Y C, ZHANG J F, QIAN H T, XU Y H. Comprehensive evaluation of soil fertility quality of urban forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 186-190, 223. (in Chinese)
- [19] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002(2): 202-205.  
LUO D Q, BAI J, XIE D T. On evaluation index and method of soil fertility[J]. Soil and Environment, 2002(2): 202-205. (in Chinese)
- [20] 秦川, 何丙辉, 蒋先军. 三峡库区不同土地利用方式下土壤养分含量特征研究[J]. 草业学报, 2016, 25(9): 10-19.  
QIN C, HE B H, JIANG X J. Characteristics of soil nutrient content under different land use in three gorges reservoir area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(9): 10-19. (in Chinese)
- [21] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 原伟杰, 王淮亮, 党晓宏. 阴山北麓不同土地利用类型土壤养分特征分析与评价[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 230-238.  
GAO J L, LUO F M, GAO Y, YUAN W J, WANG H L, DANG X H. Analysis and evaluation of soil nutrient characteristics of different land use types in the northern foothills of Yinshan Mountain[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(4): 230-238. (in Chinese)
- [22] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992.  
ZHU Z L, WEN Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [23] 陶汝鹏, 吴志辉. 宁国市山核桃主产区土壤肥力调查与分析[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(18): 73-75, 84.  
TAO R P, WU Z H. Investigation and analysis of soil fertility in main producing areas of pecan in Ningguo city[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018, 24(18): 73-75, 84. (in Chinese)
- [24] 杨义波, 王菲. 长春市重要园林植物群落土壤肥力特征分析与评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 193-198.  
YANG Y B, WANG F. Analysis and evaluation of soil fertility characteristics of important garden plant communities in Changchun[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 193-198. (in Chinese)
- [25] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, Ongaro Luca, Shibasaki Ryosuke. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. 中国农业科学, 2007(8): 1697-1702.  
WU W B, YANG P, TANG H J, ONGARO L, SHIBASAKI R. Study on regional differences of land use effects on soil properties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007(8): 1697-1702. (in Chinese)
- [26] 吴小芳, 张振山, 范琼, 邓爱妮. 海南省果园土壤肥力综合评价研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 2109-2118.  
WU X F, ZHANG Z S, FAN Q, DENG A N. Comprehensive evaluation of soil fertility in orchards of Hainan province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 2109-2118. (in Chinese)
- [27] 刘立龙, 杨彩玲, 蒋代华, 肖斌, 崔俊峰. 连栽桉树人工林不同代次土壤养分与酶活性的分析[J]. 热带作物学报, 2013, 34(11): 2117-2121.  
LIU L L, YANG C L, JIANG D H, XIAO B, CUI J F. Soil nutrients and enzymes activity in *Eucalyptus* plantations under different rotations of continuously planting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(11): 2117-2121. (in Chinese)
- [28] 曹明, 符启位, 李晨, 韩晓燕. 三亚市冬季瓜菜种植土壤地力情况分析[J]. 长江蔬菜, 2019, 473(3): 60-62.  
CAO M, FU Q W, LI C, HAN X Y. Soil fertility analysis of melon and vegetable planting in winter in Sanya city[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2019, 473(3): 60-62. (in Chinese)
- [29] 罗健, 王笃雄, 李成林, 吴清汉. 土壤管理对海南油茶低产林土壤性质及产量的影响[J]. 热带林业, 2020, 48(3): 44-47.  
LUO J, WANG D X, LI C L, WU Q H. Effects of soil management on soil properties and yield of *Camellia oleifera* low yield forest in Hainan province[J]. Tropical Forestry, 2020, 48(3): 44-47. (in Chinese)
- [30] 唐群锋, 吴炳孙, 曹启民, 郭澎涛, 覃姜薇, 刘志崴. 海南乌石农场橡胶园地力评价与土壤养分空间分布特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(11): 116-121.  
TANG Q F, WU B S, CAO Q M, GUO P T, QIN J W, LIU Z W. Fertility evaluation and spatial distribution characteristics of soil nutrients of rubber plantations in Hainan Wushi Farm[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(11): 116-121. (in Chinese)