

钦州湾红树林土壤肥力及其 C、N、P、K 化学计量特征

何琴飞, 申文辉, 彭玉华, 刘 秀, 谭长强, 陆国导

(广西壮族自治区林业科学研究院, 广西 南宁 530002)

摘 要:为了研究广西钦州湾红树林的土壤特性,在该区域内选取 9 个具有代表性的红树林群落进行样方调查和样品采集,分析测试土壤有机质、速效 N、速效 P、速效 K、pH 值、全盐量和土壤容重等 7 个指标,并计算分析土壤肥力系数和 C、N、P、K 生态化学计量比。结果表明,红树林泥质型土壤容重较轻且呈酸性,pH 值 3.8~5.6,但沙质、沙泥质型土壤接近中性,pH 值为 7.2~7.6。红树林土壤含盐量高,平均为 16.3 g·kg⁻¹,有机质、速效 N、速效 P、速效 K 的含量丰富,平均值分别为 31.6 g·kg⁻¹、93.1 mg·kg⁻¹、11.6 mg·kg⁻¹、545.9 mg·kg⁻¹,且不同类型之间存在显著差异($P<0.05$)。红树林土壤综合肥力系数(P_j)变化范围为 1.09~1.99,平均值为 1.43±0.29,其中类型 4 白骨壤纯林(泥质土)的土壤 P_j 最大,属于肥沃($1.8\leq P_j<2.7$),其他类型的土壤均属于一般水平($0.9\leq P_j<1.8$),表明红树林土壤肥力一般偏肥沃、不贫瘠,而速效 N 是影响红树林土壤肥力的主要因素。红树林土壤的生态化学计量比 C/N、C/P、C/K、N/P 平均值分别为 203.1、1 779.4、41.0、9.1,不同类型之间差异显著,表明不同类型的红树林对土壤养分的分配利用不同。

关键词:红树林;土壤肥力;化学计量比;有机质

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)06-0119-06

Soil Fertility and C,N,P,K Ecological Stoichiometry of Mangroves in Qinzhou Bay,Guangxi

HE Qin-fei, SHEN Wen-hui, PENG Yu-hua, LIU Xiu, TAN Zhang-qiang, LU Guo-dao

(Guangxi Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi 53002, China)

Abstract: In order to understand soil characteristics of mangroves, based on the data of 7 indexes, including soil organic matter, available N, P, K, pH-value, total salt content and bulk density, the soil fertility and C, N, P, K ecological stoichiometry of 9 mangrove types were analyzed in Qinzhou Bay, Guangxi. The results showed that mangrove muddy soils were those with light bulk density and highly acidic, pH values ranged from 3.8 to 5.6, whereas mud sandy and sandy soils were neutral, pH values were from 7.2~7.6. Salt levels were high with an average of 16.3 g/kg. The contents of organic matter, available N, P, K were rich, with mean values of 31.6 g/kg, 93.1 mg/kg, 11.6 mg/kg, and 545.9 mg/kg, respectively. There were significant differences among different mangrove types ($P<0.05$). The range of comprehensive fertility coefficient (P_j) of soil was 1.09~1.99 (with the mean value of 1.43±0.29), in which the soil of *Avicennia marina* pure forest (type 4) was in the highest level, belonging to fertile rank ($1.8\leq P_j<2.7$), while other soil types were in the middle level ($0.9\leq P_j<1.8$). It indicated that soil fertility of mangroves in Qinzhou Bay was effective and not barren, but available N was the limiting factor. Utilization of soil nutrients by different mangrove plants was different. The ratios of key soil nutrients for C/N, C/P, C/K, and N/P were 203.1, 1 779.4, 41.0, and 9.1, respectively. There were significant differences among different mangrove types.

收稿日期:2017-04-18 修回日期:2017-07-14

基金项目:广西壮族自治区自然科学基金(2014GXNSFBA118073);自治区直属公益性科研院所专项(林科 201606 号)。

作者简介:何琴飞,女,硕士,工程师,研究方向:森林生态。E-mail:dragonfly.hqf@126.com

Key words: mangrove; soil fertility; ecological stoichiometry ratio; organic matter

土壤是植被赖以生存的物质基础,是决定植物群落格局和结构的重要生态因子之一。土壤肥力反应了土壤基本属性和本质特征,为植物生长提供必要的物质养分和机械支撑,体现了为植物生长供应营养和环境方面的能力^[1]。土壤肥力无法直接测定,但能通过测定土壤理化性质指标来计算评价。C、N、P、K 元素是重要的生命元素,其在生态系统各个水平上是相互联系的整体,受生态系统本身特性和外界环境变化的影响^[2]。生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的科学^[3],生态化学计量特征研究一直是科学研究的热点问题,主要集中在以植物和土壤为对象^[4-7]。土壤生态化学计量特征是评价植被群落土壤肥力的重要指标,对不同植被群落的土壤养分变化和土壤 C、N、P、K 元素化学计量特征进行研究,有利于阐明森林生态系统的演变机制、揭示土壤养分在土壤和植物之间的再分配利用格局。

红树林是生长在热带和亚热带地区、陆地与海洋交界的海岸潮间带滩涂上的木本植物群落,是海岸生态系统的重要组成部分和生产力最高的海洋生态系统之一,在消浪护岸、防灾减灾、净化水体、维持生物多样性和海岸带生态平衡等方面具有重要意义。红树林由于生长环境特殊,长期受海水浸泡,其生态分布受生态环境和土壤基质的影响^[8]。广西红树林面积约 5 654 hm²,占全国红树林总面积的 1/3,是我国红树林分布最多的省份之一,其中钦州湾是广西红树林面积较大、种类较为丰富的湾口。广西红树林土壤的研究主要在有机碳、理化性质与酶活性、土壤养分等方面^[9-11],并未对其土壤生态化学计量特征进行分析,因此,该研究在广西钦州湾选择不同土壤质地的滩涂上生长的不同红树林群落类型的土壤进行调查,对比分析红树林土壤肥力及 C、N、P、K 生态化学计量比,全面了解钦州湾红树林的土壤特征,有利于红树林湿地土壤碳库研究和红树林群落的恢复与保护。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

钦州湾位于北部湾顶部(21°33′20″—21°54′30″N,108°28′20″—108°45′30″E),广西海岸中段,溺谷型海湾,由内湾、湾颈和外湾构成,属亚热带海洋季风气候,夏季炎热多雨,冬季低温干燥,年平均气温 21~23℃,极端最高温 37.5℃,极端最低温 -1.8℃,年平均日照时数 1 600~1 800 h,降雨量

2 075.7~2 106.5 mm。钦州湾潮汐主要为全日潮,涨潮流速小于落潮流速,龙门港区平均潮差 2.55 m,最大潮差 5.49 m。该湾口门宽 29 km,纵深 39 km,海岸线长达 336 km,总面积 380 km²,其中红树林岸线长约 100 km,主要分布于茅尾海北部、西北部和金鼓江沿岸,在湾中部龙门群岛呈间断分布^[12]。钦州湾有红树林 3 057 hm²,宜林潮滩 4 456.4 hm²,天然更新林地 20.2 hm²,未成林造林地 134.9 hm²,红树植物主要有 8 科 11 种,分布于潮间带的红树植物主要有白骨壤(*Avicennia marina*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、秋茄(*Kandelia obvolata*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、海桑(*Sonneratia caseolaris*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*),天然林群落类型主要有桐花树、白骨壤、白骨壤+桐花树等^[13]。

1.2 样地调查

在广西钦州湾不同立地条件下选择不同类型的红树林群落,设置有代表性的样方(样方面积 10 m×10 m)进行调查,逐株测量样方内红树植物的株高、基径(避开基部有板状根等隆起的位置,离地面约 3~10 cm 处)、冠幅等生长指标。样地类型 3 有明显的二层结构,无瓣海桑平均树高 11.0 m,平均胸径 13.7 cm,其他类型的层次结构均不明显(表 1)。

1.3 样品采集和测定方法

在每个样方的对角线上采集点 0~30 cm 土层的混合样品 3 个,分别装袋带回实验室。待土样自然风干后进行指标测定,包括土壤有机质、速效 N、速效 P、速效 K、pH 值、全盐量和土壤容重。测定方法如下:有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法,速效 N 用酸滴定法,速效 P 用盐酸-硫酸浸提法,速效 K 用乙酸铵浸提-火焰光度法,pH 值用酸度计法,全盐量用电导法,容重用环刀法。

1.4 土壤肥力和生态化学计量比计算方法

土壤肥力计算所选指标之间具有不可加和性,为消除各指标间的量纲差别,采用四折线型无量纲化方法进行标准化处理^[1]:

当指标测定值为极差级时,即 $C_i \leq X_a$ 。

$$P_i = \frac{C_i}{X_a} \quad (1)$$

($P_i \leq 1$);

当指标测定值为差级时,即 $X_a < C_i \leq X_c$ 。

$$P_i = 1 + \frac{C_i - X_a}{X_c - X_a} \quad (2)$$

($1 < P_i \leq 2$);

当指标测定值为中等级时,即 $X_c < C_i \leq X_p$ 。

$$P_i = 2 + \frac{C_i - X_c}{X_p - X_c} \quad (3)$$

$(2 < P_i < 3)$;

当指标测定值为良好级时,即 $C_i > X_p, P_i = 3$;

式中: P_i 是分肥力系数,即第 i 个指标的肥力系数; C_i 为第 i 个指标的测定值; X_a 、 X_c 、 X_p 为土壤属性值分级标准(表 2),参照第二次全国土壤普查标准。

综合肥力系数采用修正的内梅罗公式计算^[14]

$$P_j = \sqrt{\frac{P_{i\text{平均}}^2 + P_{i\text{最小}}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (4)$$

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of sample plots

类型	群落组成	优势种 年龄/a	土壤 质地	株数 /(株·100 m ⁻²)	平均树高 /m	平均基径 /cm	平均冠幅 /m
1	桐花树(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	16	泥质	155	2.1	3.7	1.1
2	桐花树—杂草	16	泥质	104	1.4	2.4	0.5
3	桐花树—无瓣海桑(<i>Sonneratia caseolaris</i>)	16,13	泥质	59(46:13)	4.1	5.9	1.7
4	白骨壤(<i>Avicennia marina</i>)	27	泥质	93	2.2	4.7	1.7
5	桐花树+白骨壤	16,27	泥质	103(55:48)	1.5	4.2	2.5
6	桐花树+白骨壤+秋茄(<i>Kandelia obvol-ata</i>)	16,27,12	泥质	84(72:9:3)	2.4	5.8	1.6
7	白骨壤	20	沙质	97	0.5	2.8	0.9
8	桐花树+白骨壤	16,20	沙泥质	105(58:47)	0.6	2.2	0.9
9	白骨壤+桐花树+秋茄	25,16,12	沙泥质	27(17:5:5)	1.7	5.6	2.2

注:括号中的数字表示各优势种株数。

表 2 土壤属性分级标准

Table 2 Classification standard of soil property

土壤属性	X_a	X_c	X_p
有机质/(g·kg ⁻¹)	10	20	30
速效 N/(mg·kg ⁻¹)	60	120	180
速效 P/(mg·kg ⁻¹)	5	10	20
速效 K/(mg·kg ⁻¹)	50	100	200

2 结果与分析

2.1 红树林土壤理化性质

土壤有机质等 8 个理化指标之间均存在显著差异($P < 0.05$)。土壤有机质含量 9.4~55.5 g·kg⁻¹,均值为 31.6 g·kg⁻¹,变化范围大,其中类型 4 白骨壤纯林和类型 6 桐花树+白骨壤+秋茄混交林有机质含量最高,均为 55.5 g·kg⁻¹,且同一类型的红树林群落,泥质土有机质含量高于沙质或沙泥质土,有机 C 含量与有机质含量的变化规律一致(表 3)。

土壤速效 N 含量是 47.4~149.6 mg·kg⁻¹,平均值为 93.1 mg·kg⁻¹,其中类型 4 白骨壤纯林(泥质土)含量最高,类型 7 白骨壤纯林(沙质土)含量最少。速效 P 介于 6.5~17.7 mg·kg⁻¹,平均含

式中: P_j 是土壤综合肥力系数, $P_{i\text{平均}}$ 和 $P_{i\text{最小}}$ 分别是土壤各属性分肥力系数的平均值和最小值, n 为参与评价的土壤属性个数。

土壤生态化学计量特征 C/N、C/P、C/K、N/K 的比值通过测定的土壤有机 C、速效 N、速效 P 和速效 K 来计算。

1.5 统计分析

采用 SPSS19.0 对土壤理化性质指标和化学计量比进行 One-Way ANOVA 单因素方差分析和 Duncan 多重比较。

量 11.6 mg·kg⁻¹,其中类型 1 桐花树纯林、类型 2 桐花树—杂草、类型 3 桐花树—无瓣海桑混交林和类型 9 白骨壤+桐花树+秋茄混交林(泥沙质土)均显著小于其他类型($P < 0.05$)。速效 K 总体含量较高,平均达到 545.9 mg·kg⁻¹,但各类型之间差异很大,变幅在 200.9~1 001.0 mg·kg⁻¹之间,其中类型 3 最小,类型 4 最大。同一类型的红树林群落,泥质土速效 N、速效 P、速效 K 含量均高于沙质或沙泥质土。

类型 1~6 的土壤均为泥质,pH 值 3.8~5.6,呈中等酸性(4.5~5.5)或强酸性(<4.5),而类型 7~9 的土壤为沙质或沙泥质,pH 值为 7.2~7.6,接近中性,可见,生长于沙质较重的红树植物对土壤的酸化作用弱。土壤全盐含量在 4.8~38.9 g·kg⁻¹变化,其中白骨壤对盐度的耐受范围很广,在含盐量 8.7~38.9 g·kg⁻¹的土壤均能生长。而土壤容重较为稳定,变化幅度相对于小于其他指标,为 0.88~1.22 g·cm⁻³,其中类型 7~9 的沙质、沙泥质土壤容重较大。

2.2 红树林土壤肥力

土壤养分指标主要是有机质、速效 N、速效 P、速效 K,各指标的肥力系数及综合肥力系数见表 4。

红树林土壤速效 K 含量最高,9 个类型土壤速效 K 肥力系数均为 3.00,处于Ⅰ级;有机质含量的肥力系数为 0.94~3.00,平均值为 2.48 ± 0.77 ,变异系数为 31.2%,处于Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级的类型数量分别为 5、5、2;速效 N 含量的肥力系数为 0.79~2.49,平均值为 1.55 ± 0.56 ,变异系数为 36.3%,处于Ⅱ

级、Ⅲ级、Ⅳ级的类型数量分别为 3、5、1;速效 P 含量有 5 个类型处于Ⅱ级,有 4 个类型处于Ⅲ级,肥力系数为 1.31~2.59,平均值为 2.04 ± 0.56 ,变异系数为 27.3%。其中速效 N 的肥力系数变异最大,且Ⅲ级及以下的类型占 66.7%,是对红树林土壤肥力影响最大的因素。

表 3 红树林土壤理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties of mangroves (*mean*±*Se*)

类型	群落组成	有机质 /(g·kg ⁻¹)	有机 C /(g·kg ⁻¹)	速效 N /(mg·kg ⁻¹)	速效 P /(mg·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)	pH 值	全盐量 /(g·kg ⁻¹)	容重 /(g·cm ⁻³)
1	桐花树	35.0±4.4d	20.3±2.6ð	130.9±9.7ef	6.5±0.7a	571.9±16.1c	5.6±0.4b	13.3±0.7c	0.98±0.01b
2	桐花树一杂草	32.2±2.7cd	18.7±1.6cd	77.0±12.3abc	7.0±1.1a	262.7±32.4a	3.8±0.2a	7.2±0.4b	1.15±0.04cd
3	桐花树一无瓣海桑	33.1±1.6cd	19.2±0.9cd	58.6±5.0ab	8.8±0.8a	200.9±16.0a	4.1±0.2a	4.8±0.3a	1.14±0.02e
4	白骨壤	55.5±3.5e	32.2±2.0e	149.6±3.4f	17.7±1.4c	1001.0±59.4e	4.1±0.4a	38.9±0.9f	0.92±0.01a
5	桐花树+白骨壤	24.0±2.9bc	13.9±1.7bc	94.7±12.0cd	14.7±1.1bc	651.2±28.9c	5.6±0.2b	21.4±4.0e	1.08±0.01c
6	桐花树+白骨壤+秋茄	55.5±2.5e	32.2±1.4e	118.1±5.5de	15.9±1.1bc	662.2±40.7c	3.9±0.5a	25.0±1.6e	0.88±0.03a
7	白骨壤	14.5±1.3ab	8.4±0.7ab	47.4±5.2a	13.6±1.1b	336.6±23.2b	7.6±0.1c	8.7±0.3b	1.18±0.03de
8	桐花树+白骨壤	9.4±1.3a	5.4±0.7a	75.3±11.8abc	12.8±0.1b	433.4±13.4b	7.6±0.1c	11.4±0.4c	1.22±0.01e
9	白骨壤+桐花树+秋茄	25.4±1.1cd	14.8±0.6cd	85.9±4.5bc	7.5±0.2a	792.8±19.4d	7.2±0.1c	16.1±1.5d	1.15±0.01b

注:不同字母表示各类型的差异显著性(a=0.05),下同。

表 4 红树林土壤肥力系数

Table 4 Soil fertility coefficients of mangroves

类型	群落组成	土壤属性肥力系数				综合肥力系数
		有机质	速效 N	速效 P	速效 K	
1	桐花树	3.00	2.18	1.31	3.00	1.44
2	桐花树一杂草	3.00	1.28	1.39	3.00	1.34
3	桐花树一无瓣海桑	3.00	0.98	1.76	3.00	1.27
4	白骨壤	3.00	2.49	2.77	3.00	1.99
5	桐花树+白骨壤	2.40	1.58	2.47	3.00	1.51
6	桐花树+白骨壤+秋茄	3.00	1.97	2.59	3.00	1.75
7	白骨壤	1.45	0.79	2.36	3.00	1.09
8	桐花树+白骨壤	0.94	1.26	2.28	3.00	1.11
9	白骨壤+桐花树+秋茄	2.54	1.43	1.51	3.00	1.36

红树林土壤综合肥力系数变化范围为 1.09~1.99,平均值为 1.43 ± 0.29 ,变异系数为 20.3%,不同类型的土壤肥力有差异。根据土壤肥力分级标准(表 5),类型 4 白骨壤纯林(泥质土)的 P_j 值最大为 1.99,其土壤属于肥沃($1.8\leq P_j<2.7$),其他类型均属于一般水平,总体而言,红树林土壤肥力一般偏肥沃、不贫瘠。

表 5 土壤肥力分级标准

Table 5 Classification standard of soil fertility

等级	描述	综合肥力系数范围
Ⅰ	很肥沃	$P_j\geq2.7$
Ⅱ	肥沃	$1.8\leq P_j<2.7$
Ⅲ	一般	$0.9\leq P_j<1.8$
Ⅳ	贫瘠	$P_j<0.9$

2.3 红树林土壤生态化学计量比

不同类型红树林土壤的生态化学计量比 C/N、C/P、C/K、N/P 差异显著($P<0.05$),变异系数大。土壤 C/N 为 86.7~335.7,平均 203.1 ± 76.0 ,变异系数为 37.4%;土壤 C/P 为 426.3~3119.9,平均 1779.4 ± 941.8 ,变异系数为 52.9%;土壤 C/K 为 12.5~100.6,平均值为 41.0 ± 29.0 ,变异系数为 70.8%;土壤 N/P 为 3.5~21.1,平均值为 9.1 ± 5.1 ,变异系数为 56.3%。其中类型 3 桐花树一无瓣海桑混交林土壤的 C/N、C/K 最大,而类型 1 桐花树纯林 C/P、N/P 最大,类型 8 白骨壤+桐花树混交林(沙泥质土)C/N、C/P、C/K 均最小,N/P 仅略大于类型 7 白骨壤纯林(沙质土)。可见不同类型的红树林群落对土壤养分的分配利用均不同(表 6)。

表 6 红树林土壤生态化学计量比

Table 6 Soil ecological stoichiometry ratios of mangroves (*mean*±*se*)

类型	群落组成	C/N	C/P	C/K	N/P
1	桐花树	157.6±18.44b	3119.9±240.22c	35.1±3.48ab	21.1±2.72d
2	桐花树—杂草	259.8±21.87c	2836.5±210.20c	73.7±5.88c	11.0±0.24bc
3	桐花树—无瓣海桑	335.7±23.56d	2236.0±136.55b	100.6±12.65d	6.7±0.15abc
4	白骨壤	215.2±12.19bc	1832.4±135.38b	32.6±4.08ab	8.5±0.49abc
5	白骨壤+桐花树	147.8±8.99ab	941.8±87.85a	21.2±1.73a	6.4±0.45abc
6	白骨壤+桐花树+秋茄	273.9±18.57cd	2037.0±65.91b	48.9±3.18b	7.5±0.56abc
7	白骨壤	179.4±13.66b	622.6±42.48a	25.5±3.70ab	3.5±0.12a
8	白骨壤+桐花树	86.7±14.63a	426.3±57.75a	12.5±1.60a	5.9±0.92ab
9	白骨壤+桐花树+秋茄	172.1±4.82b	1961.9±94.37b	18.6±0.82a	11.4±0.46c

3 结论与讨论

土壤 pH 值对土壤养分的有效性和植被的营养状态影响很大^[15]。红树林对土壤有酸化作用,其在生长过程中不断地从土壤中吸收 SO_4^{2-} ,并以硫化物的形态累积于体内,再以枯枝落叶等被埋藏分解的形式归还土壤,大量的硫进入土壤^[16],随着土壤硫含量的增加,土壤 pH 呈对数曲线下降^[17]。广西钦州湾的红树林土壤 pH 值为 3.8~7.6,其中泥质土呈中等或强酸性,沙质、沙泥质土接近中性,属潜在酸性硫酸盐土。沙质、沙泥质土壤 pH 不呈酸性,可能与其生长环境的土壤紧实、容重大,不利于红树林枯落叶储藏、分解有关。红树林是盐生或耐盐植物,能产生强烈的“生物积盐作用”,其基质土壤中盐分含量一般是 0.50%~2.00%,高者达 3.573%^[18],本研究中 9 个类型的红树林土壤含盐量较高,平均为 16.3 g·kg⁻¹。

从土壤养分元素看,钦州湾红树林土壤有机质、速效 N、速效 P、速效 K 的含量丰富,不同类型之间存在显著差异,这与已有的研究报道一致^[19-20]。红树林对土壤产生“生物自肥作用”,将大量枯枝落叶归还土壤,为土壤有机质和营养元素的积累提供物质基础。红树林由于特殊的生境,通过发达的根系,能有效的网罗有机碎屑,固定和沉积污染物,增加土壤 N、P、K 等的含量^[21]。相同类型的红树林群落,其底泥为泥质的土壤(类型 4、5、6)有机质、速效 N、速效 P、速效 K 含量均高于沙质或沙泥质土(类型 7、8、9),且同类红树植物在泥质土中生长更好,曾有研究表明:植物与土壤养分之间存在相互促进的关系^[22],高生物量区域的土壤有机质和全氮含量高^[23]。从红树林土壤的综合肥力系数(P_j)来看,红树林土壤肥力一般偏肥沃水平、不贫瘠,其变化范围为 1.09~1.99,整体肥力状况优于一般陆地林分,北京 13 种林分的肥力系数变幅为 0.87~1.85^[1]。从各土壤属性的分肥力系数看,速效 K 含量最高,K

元素能促进植物碳水化合物代谢和氮素代谢等生命活动,同时 K 能有效地促进光合作用,K 含量高的叶片转化能力是低含量的 5~7 倍^[24],这正符合红树林植物叶片的光能利用效率高、光合固碳能力较强的特点^[25]。P 元素是叶绿体中的重要组成元素,红树林土壤 P 含量较高,不同于陆地森林土壤 P 缺乏的情况,可能与红树林的特殊生境环境、植物独有的生长特性有关。而速效 N 含量较低,是影响红树林土壤肥力的主要因素。出现 N 含量较低的情况符合一般森林生态系统土壤 N 普遍缺乏的现象^[1],这可能与 N 元素的来源有关,土壤 N 主要来源于土壤有机质转化、大气干湿沉降和生物固氮等。

土壤生态化学计量特征能反映土壤养分状况和质量。钦州湾红树林土壤的生态化学计量比在不同类型之间差异显著($P<0.05$),表明红树林群落类型不同对土壤养分的分配利用不同,C/N、C/P、C/K、N/P 平均值为 203.1、1779.4、41.0、9.1,高于陆生林分土壤^[26],其中 C/N 平均值远超过了中国土壤的平均值(10~12)^[27],当土壤处于碳积累状态时,C/N 会呈增加的趋势^[28],这很好地解释了红树林湿地土壤巨大的碳汇功能。同类型的红树林群落泥质土的生态化学计量比高于沙质或沙泥质土,跟肥力的变化规律基本一致,这可能与泥质土的红树林林龄长、长势好,对养分积累利用率高有关,有研究表明:红树林土壤有机质等营养元素和生态化学计量比的大小与树种林分的生物量高低相关^[20]。

总之,红树林在泥质、沙泥质和沙质土壤中均能生长,但不同类型的红树林土壤有机质、速效 N、速效 P、速效 K 等养分的含量不同,9 个类型的红树林土壤有机质等 4 个养分指标的含量较为丰富,而影响红树林土壤肥力的主要因素是速效 N,不同类型的红树林群落对土壤养分的分配利用也不同,总体上广西钦州湾的红树林土壤养分含量较高、肥力较佳,但土壤肥力、生态化学计量特征受红树植物类型、群落组成、林龄和底质等因素的影响。关于红树

林土壤肥力与红树植物生长量、生产力的定量关系,以及红树植物的 C、N、P、K 化学计量比等方面有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 张连金,赖光辉,孙长忠,等. 北京九龙山不同林分土壤肥力诊断与综合评价[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(1):1-6.
ZHANG L J, LAI G H, SUN C Z, *et al.* Diagnosis and comprehensive evaluation on soil fertility of different stands in Beijing Jiulong mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1): 1-6. (in Chinese)

[2] 贺金生,韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报,2010,34(1):2-6.
HE J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6. (in Chinese)

[3] 曾德慧,陈广生. 生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报,2005,29(6):1007-1019.
ZENG D H, CHEN G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6): 1007-1019. (in Chinese)

[4] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3):523-534.

[5] 刘兴诏,周国逸,张德强,等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. 植物生态学报,2010,34(1):64-71.
LIU X S, ZHOU G Y, ZHANG D Q, *et al.* N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 64-71. (in Chinese)

[6] 张志才,黄金华,叶代全,等. 光皮树不同家系叶片氮、磷化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):53-58.
ZHANG Z C, HUANG J H, YE D Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus stoichiometry of different families of *Cornus wilsoniana* and their relationship to nutrient availability [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(4): 53-58. (in Chinese)

[7] 刘冰燕,陈云明,曹扬. 渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报,2016,31(1):1-6.
LIU B Y, CHEN Y M, CAO Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Robinia pseudocacia* plantation in Weiwei Loess Plateau Region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 1-6. (in Chinese)

[8] 李信贤,温远光,温肇穆. 广西海滩红树林主要建群种的生态分布和造林布局[J]. 广西农学院学报,1991,10(4):82-89.
LI X X, WEN Y G, WEN Z M. The ecological distribution and reforestation arrangement of main species of mangrove in sea-beach of Guangxi [J]. Journal of Guangxi Agricultural College, 2010, 34(1): 64-71. (in Chinese)

[9] 莫莉萍,周慧杰,刘云东,等. 广西红树林湿地土壤有机碳储量估算[J]. 安徽农业科学,2015,43(15):81-84.

MO L P, ZHOU H J, LIU Y D, *et al.* An estimation of soil organic carbon storage in mangrove wetlands of Guangxi [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2015, 43(15): 81-84. (in Chinese)

[10] 何斌,温远光,袁霞,等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究[J]. 林业科学,2002,38(2):21-25.
HE B, WEN Y G, YUAN X, *et al.* Studies on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(2): 21-25. (in Chinese)

[11] 何琴飞,蒋焱,刘秀,等. 钦州湾不同类型红树林土壤因子调查与分析[J]. 湿地科学与管理,2011,7(3):45-48.
HE Q F, JIANG Y, LIU X, *et al.* An analysis of soil properties of different types of mangroves in Qinzhou Bay [J]. Wetland Science & Management, 2011, 7(3): 45-48. (in Chinese)

[12] 邓朝亮,刘敬合,黎广钊,等. 钦州湾海岸地貌类型及其开发利用自然条件评价[J]. 广西科学院学报,2004,20(3):174-178.
DENG C L, LIU J H, LI G Z, *et al.* Geomorphological types in the coast of the Qinzhou Bay and their assessment in natural conditions [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2004, 20(3): 174-178. (in Chinese)

[13] 李春干. 广西红树林资源的分布特点和林分结构特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(5):15-19.
LI C G. Distribution and forest structure of mangrove in Guangxi [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2003, 27(5): 15-19. (in Chinese)

[14] 阎文杰,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,1994,25(6):245-247.

[15] HARDTLE W, GVON OHEIMB, FRIEDEL A, *et al.* Relationship between pH-values and nutrient availability in forests soils: the consequences for the use of ecograms in forest ecology [J]. Flora, 2004, 199: 134-142.

[16] 徐海,陈少波,张素霞,等. 红树林土壤基本特征及发展前景[J]. 安徽农业科学,2008,36(4):1496-1497,1504.
XU H, CHEN S B, ZHANG S X, *et al.* Basic characteristics and development prospect of mangrove soil and its correlation with mangrove [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36(4): 1496-1497, 1504. (in Chinese)

[17] 龚子同,张效朴. 中国的红树林与酸性硫酸盐土[J]. 土壤学报,1994,31(1):86-93.
GONG Z T, ZHANG X P. Mangrove and acid sulphate soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 86-93. (in Chinese)

[18] 蓝福生,莫权辉,陈平,等. 广西海滩红树林与土壤的关系[J]. 广西植物,1994,14(1):54-59.
LAN F S, MO Q H, CHEN P, *et al.* The relationship between mangrove and soils on the beach of Guangxi [J]. Guihaia, 1994, 14(1): 54-59. (in Chinese)

[19] 管东生,覃朝锋. 广东和海南红树林的生物地球化学特征[J]. 热带亚热带土壤科学,1998,7(4):267-271.
GUAN D S, QIN Z F. Biogeochemical characters of mangrove forests in Guangdong and Hainan Provinces [J]. Tropical and Subtropical Soil Science [J]. 1998, 7(4): 267-271. (in Chinese)

(1);1-9. (in Chinese)

[9] 姜守忠. 贵州鬼笔属研究初报[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,1986(1):42-44.

[10] 亢学平,王鑫,胡志强,等. 12 种长白山区毒菇菌株培养基筛选初报[J]. 食用菌,2010(2):37-38.

[11] 熊鹰,吕智敏. 大球盖菇菌种培养基筛选试验[J]. 西南农业学报,2004,17(6):802-804.
XIONG Y, LU Z M. Selection of suitable culture media for *Stropharia rugoso-annulata* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2004,17(6):802-804. (in Chinese)

[12] 郭思琪,张厚良,陈志新. 厚环乳牛肝菌菌种培养基筛选试验[J]. 林业科技开发,2004,18(2):26-27.

[13] 彭秀科,高淑敏,刘海林,等. 青海野生双孢蘑菇菌种培养基筛选试验[J]. 食用菌,2015(3):20-21.

[14] 高国平,谢皖豫,王月,等. 灯台树叶枯病病原菌的鉴定及其生物学特性[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):194-197.
GAO G P, XIE W Y, WANG Y, *et al.* Pathogen identification and biological characteristics of *Cornus controversum* leaf blight[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(5):194-197. (in Chinese)

[15] 杨勇,张凤英,陈岑. PDA 培养基改良配方的研究[J]. 酿酒科技,2012(4):29-31.
YANG Y, ZHANG F Y, CHEN Q. Study on the improved formula of PDA culture medium[J]. Liquor-Making Science & Technology,2012(4):29-31. (in Chinese)

[16] 刘冬明,袁德义,邹锋,等. 3 种锥栗外生菌根真菌培养条件的单因素优化[J]. 西北林学院学报,2016,31(2):195-200.
LIU D M, YUAN D Y, ZOU F, *et al.* Optimization of culture conditions for 3 *Castanea henryi* ectomycorrhizal fungi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 195-200. (in Chinese)

[17] 饶毅萍. 几种含氮盐对平菇菌丝体生长的影响[J]. 北方园艺, 2008(8):210-212.
RAO Y P. Influence of several kinds nitrogen salt on the even mushroom mycelium growth[J]. Northern Horticulture,2008(8):210-212. (in Chinese)

[18] 何明霞,张春霞,纪开萍,等. 暗褐网柄牛肝菌菌丝体培养基的碳源、氮源及无机盐的筛选研究[J]. 云南农业大学学报, 2009,24(5):773-777.
HE M X, ZHANG C X, JI K P, *et al.* Screening of carbon and nitrogen sources and inorganic salts mycelium culture medium of *Phlebopus portentosus* [J]. Journal of Yunnan Agricultural University,2009,24(5):773-777. (in Chinese)

[19] 卢惠妮,潘迎捷,赵勇,等. 棘托竹荪菌丝体培养基碳源、氮源、无机盐的筛选[J]. 食品工业科技,2010,31(2):178-181.
LU H N, PAN Y J, ZHAO Y, *et al.* Screening of carbon and nitrogen sources, inorganic salts for the medium of *Dictyophora echinovolva* mycelia [J]. Science and Technology of Food Industry,2010,31(2):178-181. (in Chinese)

[20] 杨顺强,罗家刚,桑正林,等. 不同 pH 值 PDA 培养基对平菇、香菇母种培养的影响[J]. 现代农业科技,2016(14):67-68.

[21] 陈玮君. 酸性 PDA 培养基的制作[J]. 河南农业,1996(1):28.

[22] 陈艳秋. 桦褐孔菌菌株遗传多样性及人工培养条件优化模式研究[D]. 长春:吉林农业大学,2007.

[23] 张端玲,毛静琴,程丽芬,等. 琼脂凝固性关键因素的研究[J]. 山西林业科技,1997(1):36-38.
ZHANG D L, MAO J Q, CHENG L F, *et al.* Study on key factors of agar solidification[J]. Shanxi Forestry Science and Technology,1997(1):36-38. (in Chinese)

(上接第 124 页)

[20] 陈粤超,王占印,许方宏,等. 不同类型的红树林土壤养分和生态化学计量特征比较[J]. 桉树科技,2016,33(1):32-37.
CHEN Y C, WANG Z Y, XU F H, *et al.* Studies on soil nutrients and ecological stoichiometry of different types of mangroves [J]. Eucalypt Science & Technology,2016,33(1):32-37. (in Chinese)

[21] 陈桂珠. 研究保护和开发利用红树林生态系统[J]. 生态科学, 1991(11):116-119.

[22] JIAO F, WEN Z M, AN S S. Changes in soil properties across a chrono sequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. Catena,2011,86(2):110-116.

[23] TIAN H, CHEN G, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils;a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry,2009,98(1/3):139-151.

[24] 吴朝学,严理,秦武明,等. 木荷人工林营养元素分布格局[J]. 西北林学院学报,2017,32(1):54-61.
WU C X, YAN L, QIN W M, *et al.* Distribution characteristics of nutrient elements in *Schima superba* plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 54-61. (in Chinese)

[25] 李林锋,吴小凤,刘素青. 湛江 5 种红树林树种光合作用特性及光合固碳能力研究[J]. 广西植物,2015,35(6):825-832.

[26] LI L F, WU X F, LIU S Q. Characteristics of photosynthesis and photosynthetic carbon fixation capacity of five mangrove tree species in Zhanjiang City [J]. Guihaia,2015,35(6):825-832. (in Chinese)

[27] 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响[J]. 生态学报,2014,34(9):2246-2255.
HU Q W, NIE L Q, ZHENG Y M, *et al.* Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(9):2246-2255. (in Chinese)

[28] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(8):3937-3947. (in Chinese)

[29] 王维奇,全川,曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J]. 中国环境科学,2010,30(10):1130-1134.
WANG W Q, TONG C, ZENG C S. Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and anaerobic carbon decomposition of wetland soil [J]. China Environmental Science,2010,30(10):1130-1134. (in Chinese)