

•研究报告•

北热带喀斯特季节性雨林土壤和6个常见树种凋落物的C、N、P化学计量学特征

郭屹立^{1,2} 李冬兴^{1,2} 王 斌^{1,2} 白坤栋^{1,2} 向悟生^{1,2} 李先琨^{1,2*}

1 (广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006)

2 (广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西凭祥 532699)

摘要: 凋落物是森林生态系统的有机质和养分储藏库, 是土壤和植物间物质交换的枢纽, 是森林土壤肥力的主要来源之一。本文选取弄岗喀斯特季节性雨林15 ha森林动态监测样地中布设的90个凋落物收集器自2014年3月至2015年2月收集的6个常见种的凋落叶, 结合2014年7月沿海拔梯度(185–368 m)采集的50个土壤样品, 研究了土壤和凋落物的C、N、P化学计量学特征及其沿海拔梯度的变化趋势。结果表明, 除P含量在高坡位及峰顶较低外, 土壤中的C、N、P含量均达到了全国第二次土壤普查分类标准中的一级水平; 土壤的C、N含量及C:P和N:P与海拔呈正比, P含量和C:N与海拔呈反比。因本文采样的海拔差异较小, 推测上述土壤养分含量与海拔的关系主要是由于微地形引起的土壤差异而不是海拔差引起的气象因子差异所致。与其他森林生态系统相比, 这6个常见种凋落叶的C、N、P含量的平均值呈现出高C和N、低P的格局; 而不同海拔凋落叶的C、N、P并未表现出类似土壤中的变化规律; 6个常见种凋落叶均表现出春季较高的C含量和夏季较高的N、P含量。虽然桂西南喀斯特季节性雨林中土壤的C、N、P含量总体水平较高, 但其单位面积内的胸高断面面积之和却远低于其他森林生态系统, 表现为生物承载力较低; 受个体生长环境差异的影响, 同种凋落叶的C、N、P化学计量学特征可能会存在个体间差异。研究结果将为我国西南地区典型喀斯特生态脆弱区的生态功能恢复与植被重建提供科学依据。

关键词: 喀斯特季节性雨林; 化学计量学特征; 土壤; 凋落叶; 海拔梯度; 季节性变化

C, N and P stoichiometric characteristics of soil and litter fall for six common tree species in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China

Yili Guo^{1,2}, Dongxing Li^{1,2}, Bin Wang^{1,2}, Kundong Bai^{1,2}, Wusheng Xiang^{1,2}, Xiankun Li^{1,2*}

1 Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Pingxiang, Guangxi 532699

Abstract: Litter fall provides organic matter and nutrients to forest ecosystems and is central to the exchange of substances between soil and plants. It plays a vital role in the maintenance of soil organic matter and nutrient cycling in forest ecosystems and it is one of the main sources of soil fertility. We used litter fall data for six common tree species collected between March 2014 and February 2015 from 90 litter fall traps, and fifty soil samples collected in July 2014 along an altitudinal gradient from 185 to 368 m in a tropical karst forest in Guangxi, China. We studied the C, N and P stoichiometric characteristics of soil and litter fall, and their trends along an altitudinal gradient. Soil C and N contents were all positively associated with altitude, while P content was negatively associated with altitude. Soil C:N was negatively associated with altitude, while C:P and N:P were positively associated with altitude. Due to the narrow altitudinal range of the soil samples, we speculate that the association of soil nutrients with altitude is due to the effect of micro-topography

收稿日期: 2017-05-17; 接受日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(31500342, 31660130)、广西重点研发计划项目(桂科 AB16380256)、广西自然科学基金(2015GXNSFBA139050)和中国科学院西部之光项目(人字(2014) 91号)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xiankunli@163.com

and not a climatic effect. Apart from the higher slope and summit, the soil C, N, P contents reached the first classification level of the national criterion of soil nutrients. Compared with other forest ecosystems, we found greater C and N contents and lower P content than the average value of C, N, P contents for litter fall of six common species. There were no trends for C, N and P stoichiometric characteristics of the mixed sample of leaf litter for the six common tree species along an altitudinal gradient. The six common tree species have higher C content in spring and higher contents of N and P in summer. The per unit total basal area of trees in this forest was much lower than other forest ecosystems, indicating its low biomass stock. This study provides useful information for ecological restoration of a typical vulnerable karst ecosystem in China.

Key words: karst seasonal rainforest; stoichiometric characteristics; soil; litter fall of leaves; altitude gradient; seasonal variation

C、N、P是生物体最基本的组成元素,生物的生长过程实质上是对这些元素的聚集以及相对比例的调节过程(Elser et al, 2010)。凋落物在土壤中的分解是森林生态系统养分循环的基本过程之一,其分解释放的养分含量以及养分归还的速率直接影响着养分归还的质量,间接影响植物根系的吸收,并对土壤中的微生物种类、数量以及土壤矿化作用等产生影响(Rinnan et al, 2007, 2008)。生态系统生产力由所处环境中的关键养分如N、P的可利用量控制,土壤的N和P含量在一定程度上调节着植物C:N和C:P值的大小(Hogan et al, 2010)。植物体的C:N和C:P值在一定程度上可反映植物吸收营养元素时同化C的能力,即植物对营养元素的利用效率;N:P是决定群落结构和功能的关键指标,可以作为对生态系统生产力起限制性作用的营养元素的指示剂(Wardle et al, 2004)。

喀斯特生态系统是在碳酸盐岩的基础上,在大气-水-岩石-生物等交互作用下形成的具有特殊物质、能量、结构、过程和功能的一种生态系统。由于其成土速率低、土层发育浅、土壤渗漏性强,岩石界面与土壤之间缺乏风化母质的过渡层等,这种生态系统极其脆弱(Yuan, 1991),即使是自然条件下的雨水冲刷也会造成土壤侵蚀和土壤质量退化,加速区域生态环境质量恶化和生态系统服务功能下降等。森林凋落物在减少水土流失、维持土壤肥力、促进森林生态系统物质循环和能量平衡等方面具有重要作用。因此,开展喀斯特脆弱地区森林生态系统中凋落物和土壤的生态化学计量学特征研究对了解喀斯特森林生态系统物质循环特征具有十分重要的理论和现实意义。

位于广西西南部地区的弄岗国家级自然保护区目前仍保存着我国面积最大、生态系统结构最完

整、最典型的北热带喀斯特季节性雨林(郭屹立等, 2015)。郭屹立等(2016)研究了该地区单位面积内所有木质非藤本植物个体(DBH ≥ 1 cm)的胸高断面面积之和的空间分布特征,发现该生态系统地上生物量相对较低且存在强烈的空间异质性;郭屹立等(2017)研究了该区凋落物的组分构成和时空动态等特征,发现与亚热带常绿阔叶林和热带雨林等森林生态系统相比,其凋落量相对较少。相对较少的地上生物量和森林凋落量与该地区独特的地质、地貌特征引起的立地条件的严酷性,以及由此造成的树木生长速度缓慢是相对应的(郭屹立等, 2017)。而针对该生态系统中凋落残体归还给土壤的养分再循环过程及特征等研究还处于空白。

本文以桂西南喀斯特季节性雨林内建立的弄岗15 ha森林动态监测样地为研究平台,以样地内布设的90个凋落物收集器自2014年3月至2015年2月收集的6个常见种的凋落叶,以及2014年7月沿海拔梯度采集的50个土壤样品为研究对象,分析了土壤和凋落物的C、N、P化学计量学特征及其沿海拔梯度的变化趋势。其目的是:(1)探讨喀斯特季节性雨林不同海拔梯度下的土壤肥力状况和土壤C、N、P化学计量学特征的变化规律;(2)分析不同坡位下6个常见种凋落叶的C、N、P化学计量学特征及其季节性变化规律;(3)初步探讨海拔梯度下土壤和植物凋落物养分状况的相关性。本研究将有助于更深入地认识喀斯特森林生态系统土壤肥力特征、凋落残体归还给土壤的养分循环规律和系统稳定机制等,为喀斯特退化生态系统的恢复重建提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

弄岗国家级自然保护区位于广西壮族自治区龙

州县东北和宁明县以北一带(22°13'56"–22°33'09" N, 106°42'28"–107°04'54" E), 呈东南–西北长条状, 由弄岗、陇呼和陇瑞3个片区组成, 总面积10,077 ha。土壤类型主要为原始石灰土、黑色石灰土、棕色石灰土、水化棕色石灰土及淋溶红色石灰土, 且不同生境间土壤类型差异明显。本区属热带季风气候, 春夏之际受印度洋北部西南季风影响, 夏秋受赤道季风影响, 冬季则受大陆高压东北季风影响; 年平均降水量1,150–1,550 mm, 主要分布在5–9月, 而11月至翌年2月降雨较少, 具有明显的干湿季节之分; 年平均气温22℃, 最冷月平均温度在13℃以上; 风速常年较小, 风向变化多与谷向一致, 受季风环流影响, 每年的1–4月风速较大。

遵循CTFS (Center for Tropical Forest Science) 样地建设标准(Condit, 1998), 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所于2011年在弄岗保护区内建立了15 ha森林动态监测样地(22°25' N, 106°57' E)。该样地是中国森林生物多样性监测网(Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network, CForBio)和CTFS网络中唯一的典型热带喀斯特森林监测样地, 是广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站“一站两点”建站模式中的弄岗监测点重点建设样地。样地东西长500 m, 南北宽300 m, 海拔范围180–370 m。样地内生境异质性较高, 包括了从山顶、山坡到洼地等一系列典型的“峰丛–洼地”生境类型。样地物种丰富, 其中DBH ≥ 1 cm的木质非藤本植物223种, 隶属于56科157属(王斌等, 2014)。

1.2 研究方法

1.2.1 凋落物收集与研究对象选择

2012年4月, 我们依据地形、生境、群落类型等特征在样地中布设了90个凋落物收集器。收集器大小0.71 m × 0.71 m, 距地面高度约0.80 m, 尼龙网孔

径1 mm; 凋落物的收集周期为每年的6–11月每周一次, 其他月份两周一次; 以收集器为单位, 按花、果实、枝干、叶片及其他杂物将凋落物进行分类, 并对叶片和果实进行物种鉴定; 在80℃烘干至恒重后称重并记录(郭屹立等, 2017)。

选择2014年3月至2015年2月不同坡位上收集的凋落物中凋落量较大的两个常见种进行养分浓度的测定。上坡为椴树科的海南椴(*Diplodiscus trichosperma*)和大戟科的闭花木(*Cleistanthus sumatranus*), 中坡为马鞭草科的广西牡荆(*Vitex kwangsiensis*)和梧桐科的苹婆(*Sterculia monosperma*), 低坡为云实科的中国无忧花(*Saraca dives*)和含羞草科的广西棋子豆(*Archidendron guangxiensis*) (表1, 附录1)。由于凋落叶占凋落物总量的85%以上(郭屹立等, 2017), 因此选择凋落叶作为凋落物养分分析的研究对象。

1.2.2 凋落物元素测定

选择凋落物收集器中收集的上述6个常见种的凋落叶进行粉碎并用于元素分析, 每个季节、每个物种3个重复。其中全碳(C)含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定(LY/T 1237–1999), 全氮(N)含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、流动注射仪法测定(LY/T 1269–1999), 全磷(P)含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、钼锑抗比色法测定(LY/T 1270–1999)。

1.2.3 土样采集和元素测定

2014年7月, 在样地内沿海拔梯度按5种生境类型划分法(峰顶、高坡位、中坡位、低坡位和洼地)对表层土壤(0–20 cm)进行取样, 记录距取土点最近植株的个体编号以确定取土点海拔等信息。每种生境10个取样位点, 计50份土壤样品。取样过程中, 因峰顶及高坡位生境中土壤稀少且随机零星分布于岩石缝隙等, 取样困难, 所以所取土样包含的凋

表1 弄岗15 ha森林动态监测样地6个常见种物种属性及其偏好生境
Table 1 Characteristics and preferred habitats of six common tree species of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

| 编号 No. | 种名 Species | 个体数 No. of individuals | 平均胸径 Mean DBH (cm) | 2014年凋落量 Litter fall in 2014 (kg/ha) | 偏好生境 Preferred habitat | 海拔 Altitude (m) |
|-----------|--|---------------------------|-----------------------|---|---------------------------|--------------------|
| SP1 | 海南椴 <i>Diplodiscus trichosperma</i> | 1,982 | 6.65 | 425.1 | 上坡位 Upper slope | 290.2 |
| SP2 | 闭花木 <i>Cleistanthus sumatranus</i> | 11,982 | 4.57 | 694.3 | 上坡位 Upper slope | 279.2 |
| SP3 | 广西牡荆 <i>Vitex kwangsiensis</i> | 9,403 | 7.87 | 542.5 | 中坡位 Middle slope | 253.9 |
| SP4 | 苹婆 <i>Sterculia monosperma</i> | 9,066 | 5.00 | 470.9 | 中坡位 Middle slope | 244.1 |
| SP5 | 中国无忧花 <i>Saraca dives</i> | 194 | 13.67 | 161.3 | 低坡位 Lower slope | 211.0 |
| SP6 | 广西棋子豆 <i>Archidendron guangxiensis</i> | 507 | 7.76 | 127.9 | 低坡位 Lower slope | 207.9 |

落物分解的腐殖质较多。将土壤样品剔除石粒和树根等杂物, 风干研磨后过筛, 装袋待用。土壤全碳含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定(NY/T 1121.6-2006), 全氮含量采用半微量开氏法-流动注射仪法测定(NY/T 53-1987), 全磷含量采用NaOH熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定(GB 7873-1987)。土壤和凋落叶化学元素含量由南宁益谱检测技术有限公司检测。

1.3 数据分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)判断不同生境类型土壤和不同物种凋落叶的C、N、P含量及C:N、N:P、C:P化学计量比的差异性($\alpha=0.05$)。首先检验数据的方差齐性, 若方差为齐性则用LSD法进行多重比较; 若方差为非齐性则用Tamhane's T2法进行多重比较。采用相关性分析方法判断土壤C、N、P含量及C:N、N:P、C:P化学计量比与海

拔之间的相关性。所有数据分析和绘图均在R 3.2.2 (R Core Team, 2015)中实现。

2 结果

2.1 土壤C、N、P化学计量学特征

样地内不同海拔梯度的表层土壤理化性质的空间变异强烈, 并与海拔表现出显著的相关性(图1)。其中, 表层土壤C含量为58.80–187.60 g/kg, 平均值为112.09 g/kg, 且随着海拔的升高逐渐增加($R^2 = 0.3628$, $P < 0.0001$); N含量为3.88–11.88 g/kg, 平均值为7.04 g/kg, 且随着海拔的升高逐渐增加($R^2 = 0.4769$, $P < 0.0001$); P含量为0.53–3.54 g/kg, 平均值为1.35 g/kg, 且随着海拔的升高逐渐降低($R^2 = 0.692$, $P < 0.0001$)。

不同生境类型中土壤C含量和N含量的变化趋势相同, 均为峰顶 > 高坡位 > 中坡位 ≈ 低坡

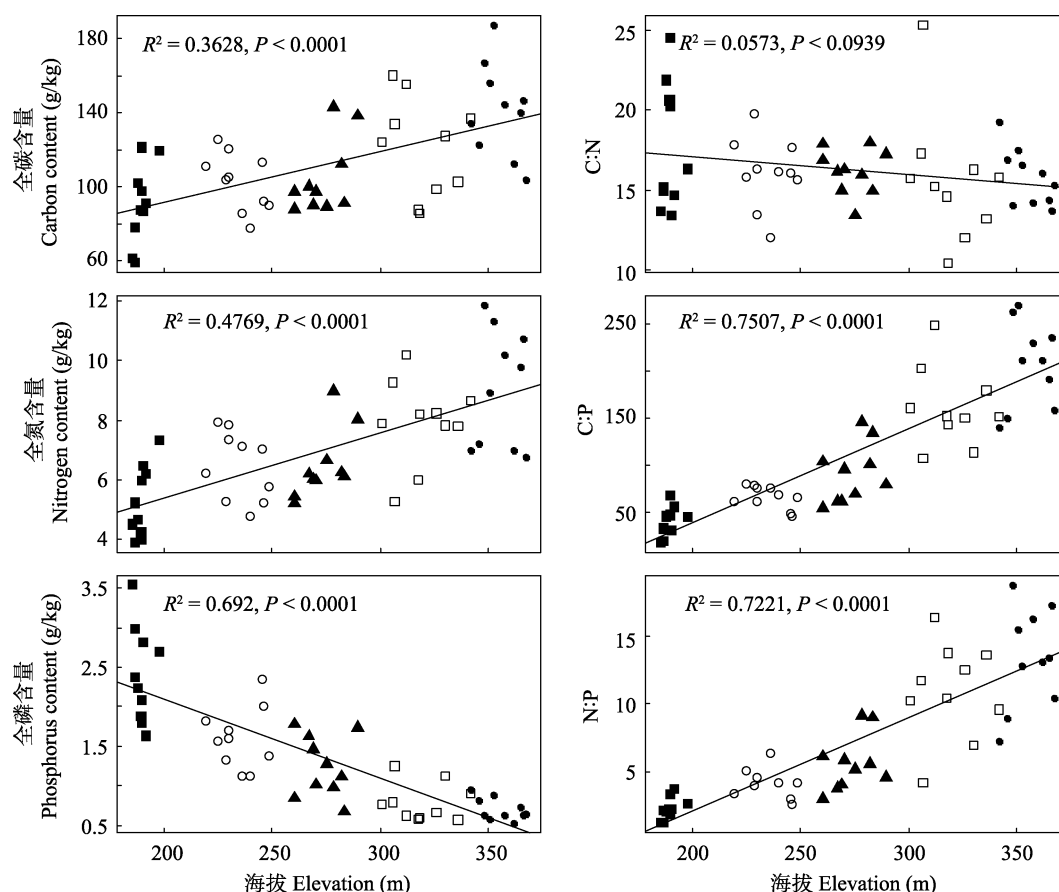


图1 弄岗15 ha森林动态监测样地不同海拔梯度下土壤的C、N、P含量及化学计量比。■洼地; ○低坡位; ▲中坡位; □高坡位; ●峰顶。

Fig. 1 Soil C, N, P contents and stoichiometry along altitude gradient of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi. ■ Depression; ○ Lower slope; ▲ Middle slope; □ Higher slope; ● Hilltop.

位 > 洼地, 而P含量则表现出相反的趋势, 即峰顶 < 高坡位 < 中坡位 < 低坡位 < 洼地, 且不同生境类型中土壤C、N、P含量多表现出显著差异性。不同生境类型的土壤C:N差异不显著, 大致表现为洼地最高、峰顶最低的格局; 不同生境类型的土壤C:P和N:P均差异显著, 都表现为峰顶最高, 洼地最低(图1, 表2)。

2.2 6个常见种凋落叶的C、N、P化学计量学特征

6个常见种凋落叶的C、N、P含量存在显著差异, 但未表现出与海拔梯度的相关性, 不同坡位间亦未表现出一定的规律性。其中, 位于高坡位的闭花木和位于低坡位的广西棋子豆的C含量显著高于其他4个物种, 且这4个物种间差异并不显著; 位于中坡位的广西牡荆和位于低坡位的广西棋子豆的N含量显著高于其他4个物种, 且相同坡位的种对间均表现出显著差异; 位于高坡位的海南椴和闭花木及位于低坡位的广西棋子豆均表现出较低的P含量(图2, 表3)。

高坡位的闭花木的凋落叶C:N显著高于其他5个物种, 而位于中坡位的广西牡荆和低坡位的广西棋子豆较低; 高坡位的闭花木和低坡位的广西棋子豆凋落叶的C:P显著高于其他4个物种, 而中坡位

的广西牡荆和苹婆及低坡位的中国无忧花则较低且相互间差异并不显著; 低坡位的广西棋子豆N:P最高, 而同样位于低坡位的中国无忧花则最低, 且二者间差异显著(图2, 表3)。

2.3 6个常见种凋落叶C、N、P化学计量学特征的时空变化

6个常见种凋落叶的C、N、P含量具有明显的季节性波动, 总体表现出春季C含量最高、夏季N和P含量最高的特征, 但部分物种不同季节的C、N、P含量差异并不显著, 如闭花木、苹婆和中国无忧花的C含量在不同季节的差异性并不显著。C:N在秋、冬季较高, 夏季最低; C:P在夏季最低; 而N:P没有明显的季节变化规律(表4)。同样, 6个常见种不同季节凋落叶的C、N、P化学计量学特征未表现出与海拔梯度的相关性, 不同坡位间亦未表现出一定的规律性。

3 讨论

3.1 土壤C、N、P化学计量学特征

在母质(石灰岩)和高温、多雨等生物气候条件的多重作用下, 喀斯特地区形成了多样化的生境类型和土壤类型。峰丛上部(峰顶和高坡位)坡度陡峭、岩牙林立, 气候干燥、水分缺乏, 生长着稀疏的干

表2 弄岗15 ha森林动态监测样地不同生境类型土壤的C、N、P含量及化学计量比(平均值±标准误)
Table 2 Soil C, N, P contents and stoichiometry (mean ± SE) in different habitat categories of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

| 生境类型 Habitat category | C (g/kg) | N (g/kg) | P (g/kg) | C : N | C : P | N : P |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 峰顶 Hilltop | 141.82 ± 7.97 ^a | 9.25 ± 0.58 ^a | 0.70 ± 0.04 ^a | 15.44 ± 0.42 ^a | 207.67 ± 13.90 ^a | 13.59 ± 1.05 ^a |
| 高坡位 Upper slope | 121.01 ± 8.38 ^b | 7.77 ± 0.45 ^{ab} | 0.79 ± 0.08 ^a | 15.93 ± 1.33 ^a | 159.75 ± 13.30 ^b | 10.70 ± 1.16 ^{ab} |
| 中坡位 Middle slope | 103.56 ± 6.69 ^c | 6.63 ± 0.36 ^b | 1.18 ± 0.102 ^{ab} | 15.65 ± 0.56 ^a | 93.332 ± 9.10 ^c | 6.00 ± 0.58 ^b |
| 低坡位 Lower slope | 103.66 ± 4.67 ^c | 6.32 ± 0.37 ^b | 1.67 ± 0.11 ^b | 16.59 ± 0.56 ^a | 63.57 ± 3.818 ^d | 3.87 ± 0.26 ^c |
| 洼地 Depression | 90.38 ± 6.68 ^d | 5.26 ± 0.38 ^c | 2.40 ± 0.19 ^c | 17.54 ± 1.25 ^{ab} | 40.77 ± 4.96 ^c | 2.32 ± 0.25 ^{cd} |

同列不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。Different lowercase letters within the same column indicate significant differences (P < 0.05).

表3 弄岗15 ha森林动态监测样地6个常见种凋落物的C、N、P含量及化学计量比(平均值±标准误)
Table 3 Litter fall C, N, P contents and stoichiometry (mean ± SE) of six common tree species of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

| 物种 Species | C (g/kg) | N(g/kg) | P (g/kg) | C : N | C : P | N : P |
|--|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 海南椴 <i>Diplodiscus trichosperma</i> | 586.24 ± 47.25 ^b | 16.37 ± 2.71 ^b | 0.63 ± 0.11 ^c | 36.43 ± 1.33 ^b | 941.69 ± 34.37 ^b | 26.12 ± 1.21 ^b |
| 闭花木 <i>Cleistanthus sumatranus</i> | 624.66 ± 32.53 ^a | 13.30 ± 4.47 ^c | 0.41 ± 0.08 ^{cd} | 50.71 ± 3.70 ^a | 1,582.98 ± 92.82 ^a | 32.32 ± 2.08 ^b |
| 广西牡荆 <i>Vitex kwangsiensis</i> | 581.99 ± 56.14 ^b | 20.42 ± 3.06 ^a | 1.08 ± 0.15 ^{ab} | 28.88 ± 1.09 ^c | 545 ± 23.32 ^c | 18.97 ± 0.70 ^c |
| 苹婆 <i>Sterculia monosperma</i> | 578.50 ± 33.51 ^b | 16.31 ± 2.06 ^b | 1.23 ± 0.27 ^a | 36.04 ± 1.58 ^b | 501.37 ± 39.61 ^c | 13.84 ± 0.77 ^d |
| 中国无忧花 <i>Saraca dives</i> | 578.49 ± 19.74 ^b | 13.94 ± 2.23 ^{bc} | 1.33 ± 0.31 ^a | 42.64 ± 2.34 ^{ab} | 450.20 ± 23.11 ^c | 10.87 ± 0.81 ^d |
| 广西棋子豆 <i>Archidendron guangxiensis</i> | 649.00 ± 51.29 ^a | 21.24 ± 2.54 ^a | 0.48 ± 0.08 ^{cd} | 31.00 ± 1.31 ^c | 1,397.22 ± 88.93 ^a | 45.10 ± 2.02 ^a |

同列不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。Different lowercase letters within the same column indicate significant differences (P < 0.05).

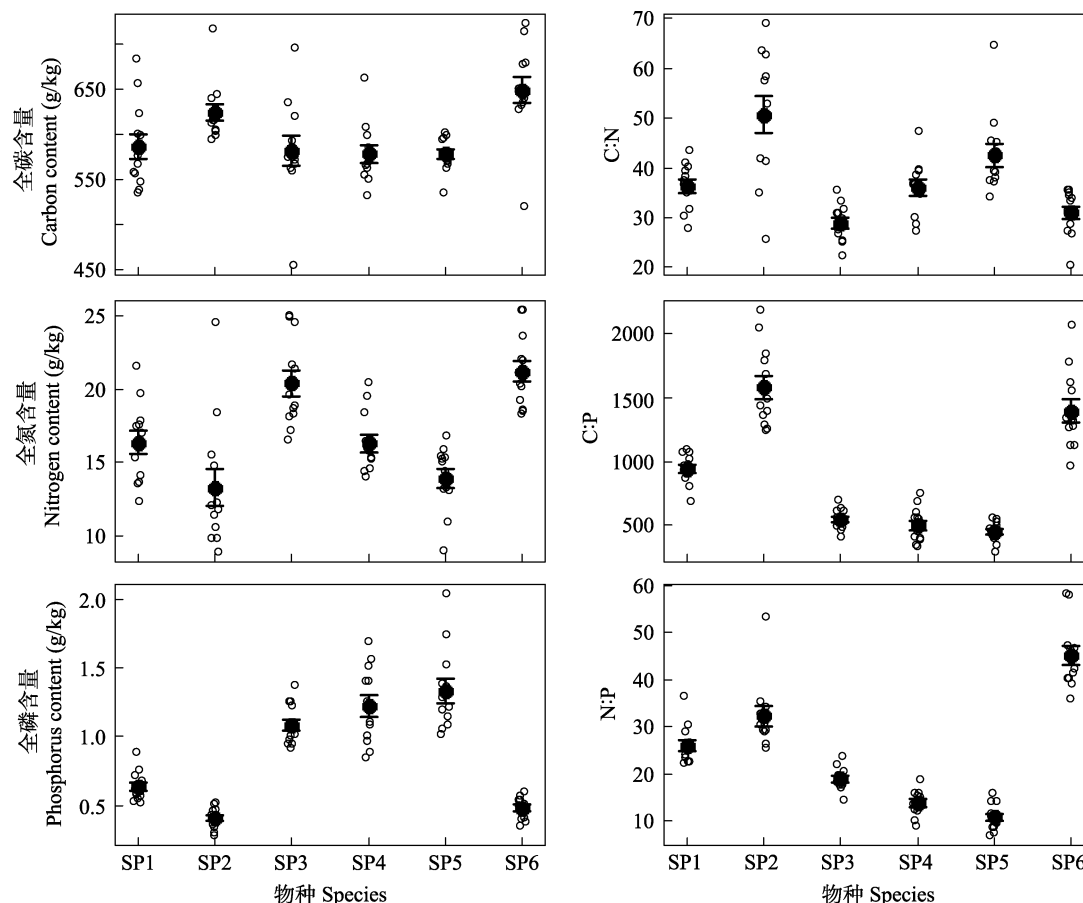


图2 弄岗15 ha森林动态监测样地6个常见树种凋落物的C、N、P含量及化学计量比(平均值±标准误差)。物种编号见表1。

Fig. 2 Litter fall C, N, P contents and stoichiometry (mean ± SE) of six common tree species of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi. The six common tree species are the same as in Table 1.

旱性山顶矮林, 如芸香竹(*Bonia saxatilis*)、毛叶铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)等, 土壤类型为黑色石灰土, 表现特征为被覆率极低、土层浅薄且多分布于岩石缝隙、但土壤有机质含量丰富; 峰丛中部和中下部坡度较缓, 气候和水分条件良好, 生长着具热带季节性雨林特征的森林植被, 土壤类型为棕色石灰土, 表现特征为被覆率较高、土层较厚且土壤有机质含量较丰富; 洼地和周边谷地常有季节性积水, 土壤形成过程受水分作用强烈, 生长着密集的耐阴湿性森林植被, 如海南风吹楠(*Horsfieldia hainanensis*)、对叶榕(*Ficus hispida*)等, 土壤被覆率最高且土层深厚, 但仍可见突出地表的大块岩石, 个别地段可见落水洞等, 土壤类型为有机质含量较低的水化棕色石灰土(陈平, 1988)。

根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 桂西南喀斯特季节性雨林不同坡位的土壤C含量和N含量均达到了一级水平(C: > 40 g/kg, N: > 2 g/kg), 土

壤P含量除高坡位和峰顶为三级水平(P: 0.6–0.8 g/kg)外, 其他均达到了一级水平(P: > 1 g/kg)。这表明桂西南喀斯特季节性雨林在局域环境中土壤养分含量较高, 其高温多雨的气候条件极有利于生物繁衍和生长, 在生物尤其是森林植被“自肥”作用的强烈影响下加速了岩石溶蚀、风化以及土壤形成和发育的进程。但是在区域环境中, 在喀斯特的特殊地形如峰林、峰丛、洼地、漏斗、槽谷、坡立谷等的作用下, 形成了地表基岩出露面积较大、土层浅薄、土壤总量少、贮水能力低、周期性干旱或水淹, 以及富钙偏碱性的严酷生存环境(郭柯等, 2011; 曹坤芳等, 2014; 郭屹立等, 2015), 使得该生态系统依然为低生物量森林生态系统, 其单位面积的胸高断面面积之和仅有22.08 m²/ha, 远低于其他不同植被类型的森林监测样地(王斌等, 2014)。而限制生物量积累的不是生物或气候条件, 而是立地条件的严酷性(郭屹立等, 2017)。

表4 弄岗15 ha森林动态监测样地不同季节6个常见种的凋落物C、N、P含量及化学计量比(平均值±标准误)
Table 4 Litter fall C, N, P contents and stoichiometry (mean ± SE) of six common tree species in different seasons of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

| 物种 Species | 季节 Season | C (g/kg) | N (g/kg) | P (g/kg) | C : N | C : P | N : P |
|---|-----------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 海南椴 <i>Diplocliscus trichosperma</i> | 春季 Spring | 631.96 ± 38.12 ^a | 17.63 ± 0.12 ^{ab} | 0.65 ± 0.06 ^a | 35.83 ± 2.09 ^{ab} | 984.01 ± 56.99 ^a | 27.63 ± 2.11 ^a |
| | 夏季 Summer | 606.89 ± 8.12 ^{ab} | 19.40 ± 1.33 ^a | 0.73 ± 0.09 ^a | 31.65 ± 2.66 ^b | 853.47 ± 34.03 ^{ab} | 27.48 ± 4.53 ^a |
| | 秋季 Autumn | 546.15 ± 5.891 ^b | 13.75 ± 0.87 ^c | 0.58 ± 0.05 ^{ab} | 40.00 ± 2.27 ^a | 949.01 ± 76.93 ^a | 23.70 ± 1.20 ^a |
| | 冬季 Winter | 559.95 ± 11.48 ^b | 14.71 ± 0.87 ^c | 0.57 ± 0.03 ^{ab} | 38.24 ± 1.64 ^a | 980.29 ± 44.97 ^a | 25.66 ± 0.87 ^a |
| 闭花木 <i>Cleistanthus sumatranus</i> | 春季 Spring | 644.94 ± 35.61 ^a | 13.01 ± 0.87 ^b | 0.43 ± 0.02 ^{ab} | 50.12 ± 4.18 ^{ab} | 1,501.64 ± 150.05 ^b | 30.17 ± 2.54 ^b |
| | 夏季 Summer | 636.59 ± 5.45 ^a | 19.48 ± 2.67 ^a | 0.50 ± 0.02 ^a | 33.93 ± 4.57 ^b | 1,284.62 ± 38.53 ^b | 39.70 ± 7.00 ^a |
| | 秋季 Autumn | 599.37 ± 2.92 ^a | 11.20 ± 0.35 ^b | 0.39 ± 0.02 ^b | 53.64 ± 1.98 ^{ab} | 1,519.62 ± 84.76 ^b | 28.32 ± 0.96 ^b |
| | 冬季 Winter | 617.74 ± 3.67 ^a | 9.50 ± 0.32 ^b | 0.31 ± 0.02 ^c | 65.13 ± 1.99 ^a | 2,026.05 ± 101.94 ^a | 31.10 ± 1.13 ^b |
| 广西牡荆 <i>Vitex kwangsiensis</i> | 春季 Spring | 621.14 ± 37.60 ^a | 20.91 ± 0.63 ^a | 0.96 ± 0.03 ^b | 29.88 ± 2.78 ^a | 646.18 ± 25.58 ^a | 21.84 ± 1.20 ^a |
| | 夏季 Summer | 604.61 ± 23.11 ^a | 24.87 ± 0.13 ^a | 1.28 ± 0.05 ^a | 24.31 ± 0.99 ^{ab} | 474.81 ± 34.03 ^b | 19.48 ± 0.64 ^a |
| | 秋季 Autumn | 568.00 ± 3.49 ^a | 18.62 ± 0.15 ^b | 1.05 ± 0.02 ^b | 30.51 ± 0.34 ^a | 541.27 ± 9.08 ^{ab} | 17.75 ± 0.49 ^a |
| | 冬季 Winter | 534.22 ± 39.44 ^{ab} | 17.29 ± 0.47 ^b | 1.04 ± 0.10 ^b | 30.84 ± 1.72 ^a | 517.75 ± 45.97 ^{ab} | 16.80 ± 1.15 ^a |
| 苹婆 <i>Sterculia monosperma</i> | 春季 Spring | 612.08 ± 26.03 ^a | 14.98 ± 0.73 ^b | 0.97 ± 0.06 ^b | 41.13 ± 3.21 ^a | 635.44 ± 60.17 ^a | 15.41 ± 0.25 ^a |
| | 夏季 Summer | 556.00 ± 15.59 ^a | 19.44 ± 0.60 ^a | 1.49 ± 0.05 ^a | 28.63 ± 0.75 ^b | 373.98 ± 16.39 ^c | 13.05 ± 0.31 ^a |
| | 秋季 Autumn | 562.55 ± 3.54 ^a | 15.23 ± 0.48 ^b | 1.22 ± 0.12 ^{ab} | 37.01 ± 1.35 ^a | 470.92 ± 44.59 ^b | 12.84 ± 1.68 ^a |
| | 冬季 Winter | 583.38 ± 13.02 ^a | 15.61 ± 0.19 ^b | 1.24 ± 0.23 ^{ab} | 37.38 ± 0.60 ^a | 525.13 ± 103.88 ^b | 14.06 ± 2.84 ^a |
| 中国无忧花 <i>Saraca dives</i> | 春季 Spring | 589.41 ± 9.94 ^a | 14.64 ± 0.69 ^a | 1.39 ± 0.28 ^a | 40.47 ± 2.52 ^b | 405.08 ± 67.98 ^a | 10.15 ± 2.07 ^a |
| | 夏季 Summer | 589.05 ± 7.66 ^a | 15.95 ± 0.47 ^a | 1.55 ± 0.20 ^a | 37.04 ± 1.54 ^b | 440.75 ± 58.67 ^a | 12.07 ± 2.12 ^a |
| | 秋季 Autumn | 566.74 ± 2.26 ^a | 14.16 ± 0.58 ^a | 1.19 ± 0.10 ^{ab} | 40.14 ± 1.54 ^b | 484.56 ± 41.07 ^a | 12.09 ± 1.06 ^a |
| | 冬季 Winter | 568.74 ± 17.89 ^a | 11.01 ± 1.22 ^b | 1.21 ± 0.04 ^{ab} | 52.90 ± 5.95 ^a | 470.40 ± 11.80 ^a | 9.15 ± 1.15 ^a |
| 广西棋子豆 <i>Archidendron guangxiensis</i> | 春季 Spring | 704.78 ± 13.80 ^a | 21.20 ± 0.48 ^a | 0.42 ± 0.06 ^b | 33.31 ± 1.38 ^a | 1,723.53 ± 216.60 ^a | 51.83 ± 6.35 ^a |
| | 夏季 Summer | 614.27 ± 47.98 ^b | 24.84 ± 0.59 ^a | 0.57 ± 0.02 ^a | 24.79 ± 2.17 ^{ab} | 1,074.73 ± 58.67 ^b | 43.66 ± 1.75 ^{ab} |
| | 秋季 Autumn | 637.85 ± 4.48 ^{ab} | 19.08 ± 0.54 ^a | 0.44 ± 0.03 ^b | 33.48 ± 1.09 ^a | 1,476.42 ± 108.41 ^{ab} | 43.97 ± 1.86 ^{ab} |
| | 冬季 Winter | 639.11 ± 6.37 ^{ab} | 19.84 ± 1.08 ^a | 0.49 ± 0.01 ^{ab} | 32.42 ± 2.01 ^a | 1,314.19 ± 19.96 ^{ab} | 40.92 ± 3.12 ^{ab} |

同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

由于本文采样的海拔差异较小,可初步排除由海拔差引起的气象因子差异。在喀斯特峰丛-洼地地质、地貌背景下,土壤C和N含量随着海拔的降低而降低,而P含量则随着海拔的降低而升高。这表明喀斯特地区的海拔对局域环境中土壤理化性质的形成具有重要作用。影响喀斯特地区土壤C含量空间分布的主要控制因素有地形、小生境类型、岩石裸露率和土层深度等(Wang et al, 2004)。地形通过控制水分、溶质和沉积物的迁移方向和通量来决定土壤理化性质空间发育的梯度和格局(张伟等, 2012)。在喀斯特地区,海拔是形成微地形或小生境的主要因素,并与坡度、岩石裸露率、土层厚度、水分、温度等地形和环境因子表现出显著的相关性(Guo et al, 2017)。而温度和水分对土壤有机质的分解起关键作用(王霖娇等, 2017),在喀斯特地区峰顶及高坡

位的高温、干旱环境下土壤有机质的分解较为缓慢,而洼地及周边低坡位分解较快。

喀斯特季节性雨林的土壤N和P含量与海拔表现出相反的趋势: N含量与海拔呈正相关而P含量与海拔呈负相关。这可能是因为土壤中的N主要由有机质分解产生,少部分来源于大气沉降和微生物固氮等(Pallardy, 2010),而未扰动森林中由淋洗造成的氮损失可以忽略不计(Cole, 1986); 磷元素则由凋落物分解、土壤矿化或成土作用形成,少部分来源于降水驱动下的磷沉降(Runyan et al, 2013),而雨季强烈的冲刷和淋溶作用会造成大量的土壤磷淋溶(Crous et al, 2015)。在喀斯特地区峰丛中上部岩石裸露率高、岩石破碎化严重、坡度陡峭等地形条件下,雨水冲刷可能会造成大量的土壤磷淋溶,并在洼地和峰丛的中下部富集; 峰丛中上部的高温、

干旱环境引起土壤有机质分解缓慢、土壤单位体积有机质含量高而表现出较高的C、N含量。

3.2 不同坡位6个常见种凋落叶的C、N、P化学计量学特征

桂西南喀斯特季节性雨林不同坡位6个常见种凋落叶的C、N、P含量的平均值呈现出高C和低P的格局。如: C含量高于长白山温带针阔混交林(485.5 g/kg)、鼎湖山亚热带常绿阔叶林(514.1 g/kg)和西双版纳雨林或季雨林(504.6 g/kg)等(王晶苑等, 2011), 远高于同为喀斯特地质背景的桂西北中亚热带常绿落叶阔叶混交林(396.2 g/kg) (曾昭霞等, 2015); N含量高于桂西北中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林(12.7 g/kg) (曾昭霞等, 2015)和鼎湖山亚热带常绿阔叶林(14.2 g/kg) (王晶苑等, 2011), 略低于全国水平(18.6 g/kg) (Han et al, 2005); P含量高于鼎湖山亚热带常绿阔叶林(0.4 g/kg) (王晶苑等, 2011), 与桂西北中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林(0.9 g/kg) (曾昭霞等, 2015)、长白山温带针阔混交林(0.7 g/kg) (王晶苑等, 2011)和全球水平相当(0.9 g/kg) (Kang et al, 2010), 低于全国水平(1.2 g/kg) (Han et al, 2005)。这种高C和低P的格局与桂西北喀斯特森林(曾昭霞等, 2015)和部分湿地植物(王维奇等, 2011)的低C高N格局不同, 这说明了桂西南喀斯特森林凋落物养分含量的特殊性。

不同坡位分布的6个常见种的凋落叶C、N、P含量并未像土壤中的C、N、P含量一样表现出海拔梯度的规律性。这表明土壤与凋落物之间的C、N、P含量的关系并不明显, 可能是因为6个常见种在样地中分布较为广泛, 尤其是中坡位的广西牡荊和苹婆、高坡位的海南椴(附录1), 它们分布位点的土壤C、N、P含量的空间异质性可能会引起植物个体间凋落叶C、N、P含量的差异性。而我们在处理收集的凋落物时是将同一物种的凋落叶进行混合后再测量, 并未按收集位点分开测量。此外, 这也可能是同一物种不同个体间的自身差异造成的。今后在研究不同海拔梯度不同物种凋落物C、N、P含量的空间变化趋势时需要在扩大研究对象的基础上, 考虑同一物种在不同分布位点的个体空间差异性。

N:P是影响凋落物分解和养分归还速率的重要因素之一, 较高的N:P值表明分解速度较慢(潘复静等, 2011)。高坡位分布的海南椴和闭花木、低

坡位的广西棋子豆的凋落叶表现出较高的N:P值。这可能是因为植物个体为适应高坡位的高温、干旱环境条件, 其叶片C含量较高, 而土壤中P含量较低, 因此高坡位物种凋落叶具有较高的N:P值; 而广西棋子豆属于豆科含羞草亚科(APG分类法), 具有固氮作用, 因此广西棋子豆与同坡位分布的中国无忧花具有更高的N:P值和N含量。除环境因素外, 植物自身特性如功能性状、系统发育等也可能会影响物种凋落物的养分含量。

3.3 6个常见种凋落叶C、N、P化学计量学特征的季节动态

6个常见种的C含量均在春季最高, 而N、P含量则在夏季最高。这可能是因为桂西南喀斯特季节性雨林在冬季和初春为旱季, 植物个体为适应这种干旱环境而C含量较高; 夏季则为雨季, 植物个体生长代谢旺盛, 因此具有较高的N、P含量。赵亚芳等(2014)对秦岭地区华北落叶松人工林C、N、P化学计量学特征的季节变化规律研究表明: 针叶植物的C含量在不同季节变化并不明显; N和P含量则在生长季含量较高、生长季末期较低; 且根茎叶不同器官间季节变化差异明显。彭彬霞等(2009)对广东大岭山亚热带常绿阔叶林7种林木凋落物养分的季节性变化研究表明: 多数物种表现出春、夏季生产量较大, 养分消耗较多; 而秋、冬季生长相对较慢, 可储存较多养分。不同研究结论间的差异可能是由气候和地质背景的差异性造成的, 如桂西南喀斯特季节性雨林在冬季和初春为旱季、夏秋季为雨季, 且存在因喀斯特地质、地貌特征引起的局域性干旱; 大岭山亚热带常绿阔叶林则在秋冬季节为旱季、春夏为雨季, 地质背景则为赤红壤的低山丘陵。此外, 形成相关结论多样性或复杂性的潜在原因可能为不同元素之间的稀疏效应、不同器官间元素的储存与转移等(Herbert et al, 2003; Townsend et al, 2007), 而不同季节土壤中因环境变化引起可吸收元素含量的变化也会影响凋落物营养元素含量的季节性变化。

致谢:衷心感谢弄岗国家级自然保护区管理局在野外工作期间提供的帮助和龙州县弄岗村的黄春和苏理生协助凋落物的收集与鉴定等。

参考文献

- Cao KF, Fu PL, Chen YJ, Jiang YJ, Zhu SD (2014) Implications of the ecophysiological adaptation of plants on tropical karst habitats for the ecological restoration of desertified rocky lands in southern China. *Scientia Sinica Vitae*, 44, 238–247. (in Chinese with English abstract) [曹坤芳, 付培立, 陈亚军, 姜艳娟, 朱师丹 (2014) 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示. *中国科学: 生命科学*, 44, 238–247.]
- Chen P (1988) A report on the soil investigation of the Longgang Natural Reserve. *Guihaia*, 8 (Suppl.1), 52–73. (in Chinese with English abstract) [陈平 (1988) 弄岗自然保护区土壤考察报告. *广西植物*, 8(增刊1), 52–73.]
- Cole DW (1986) Nutrient cycling in world forests. In: *Forest Site and Productivity* (ed. Gessel SP), pp. 103–125. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and A Comparison with Other Plots*. Springer, Berlin.
- Crous KY, Ósvaldsson A, Ellsworth DS (2015) Is phosphorus limiting in a mature *Eucalyptus* woodland? Phosphorus fertilisation stimulates stem growth. *Plant and Soil*, 391, 293–305.
- Elser JJ, Fagan WF, Kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ (2010) Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 186, 593–608.
- Guo K, Liu CC, Dong M (2011) Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of Southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 991–999. (in Chinese with English abstract) [郭柯, 刘长成, 董鸣 (2011) 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. *植物生态学报*, 35, 991–999.]
- Guo YL, Li DX, Wang B, He YL, Xiang WS, Li XK (2017) Composition and spatio-temporal dynamics of litter fall in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 25, 265–274. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 李冬兴, 王斌, 何运林, 向悟生, 李先琨 (2017) 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态. *生物多样性*, 25, 265–274.]
- Guo YL, Wang B, Mallik AU, Huang FZ, Xiang WS, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Li DX, He YL, Li XK (2017) Topographic species-habitat associations of tree species in a heterogeneous tropical karst seasonal rain forest, China. *Journal of Plant Ecology*, 10, 450–460.
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang FZ, Wen SJ, Li DX, He YL, Li XK (2016) Responses of spatial pattern of woody plants' basal area to topographic factors in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 24, 30–39. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄甫昭, 文淑均, 李冬兴, 何运林, 李先琨 (2016) 喀斯特季节性雨林木本植物胸高断面面积分布格局及其对地形因子的响应. *生物多样性*, 24, 30–39.]
- Guo YL, Wang B, Xiang WS, Ding T, Lu SH, Huang YS, Huang FZ, Li DX, Li XK (2015) Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 23, 183–191. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄俞淞, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨 (2015) 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析. *生物多样性*, 23, 183–191.]
- Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y (2005) Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 168, 377–385.
- Herbert DA, Williams M, Rastetter EB (2003) A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment. *Biogeochemistry*, 65, 121–150.
- Hogan EJ, Minnullina G, Smith RI, Crittenden PD (2010) Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen: phosphorus relationships in *Cladonia portentosa*. *New Phytologist*, 186, 911–925.
- Kang HZ, Xin ZJ, Breg B, Burgess PJ, Liu QL, Liu ZC, Li ZH, Liu CJ (2010) Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants. *Annals of Forest Science*, 67, 811.
- Pallardy SG (2010) *Physiology of woody plants*. Academic Press, Amsterdam.
- Pan FJ, Zhang W, Wang KL, He XY, Liang SC, Wei GF (2011) Litter C : N : P ecological stoichiometry character of plant communities in typical karst peak-cluster depression. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 335–343. (in Chinese with English abstract) [潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富 (2011) 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征. *生态学报*, 31, 335–343.]
- Peng BX, Han XJ, Chen J (2009) Seasonal changes in nutrient content of the litter layers in seven plantation forests. *Guangdong Agricultural Sciences*, (10), 97–99. (in Chinese with English abstract) [彭彬霞, 韩锡君, 陈军 (2009) 七种林分凋落物的养分季节性变化研究. *广东农业科学*, (10), 97–99.]
- R Core Team (2015) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2015–12–01)
- Rinnan R, Michelsen A, Bååth E, Jonasson S (2007) Mineralization and carbon turnover in subarctic heath soil as affected by warming and additional litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 3014–3023.
- Rinnan R, Michelsen A, Jonasson S (2008) Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 39, 271–281.

- Runyan CW, D'Odorico P, Vandecar KL, Das R, Schmook B, Lawrence D (2013) Positive feedbacks between phosphorus deposition and forest canopy trapping, evidence from Southern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118, 1521–1531.
- Townsend AR, Cleveland CC, Asner GP, Bustamante MM (2007) Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology*, 88, 107–118.
- Wang B, Huang YS, Li XK, Xiang WS, Ding T, Huang FZ, Lu SH, Han WH, Wen SJ, He LJ (2014) Species composition and spatial distribution of a 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamics study plot in Nonggang, Guangxi, southern China. *Biodiversity Science*, 22, 141–156. (in Chinese with English abstract) [王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 黄甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军 (2014) 弄岗北热带喀斯特季节性雨林15 ha 监测样地的树种组成与空间分布. 生物多样性, 22, 141–156.]
- Wang JY, Wang SQ, Li RL, Yan JH, Sha LQ, Han SJ (2011) C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 587–595. (in Chinese with English abstract) [王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰 (2011) 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征. 植物生态学报, 35, 587–595.]
- Wang LJ, Sheng MY, Du JY, Wen PC (2017) Distribution characteristics of soil organic carbon and its influence factors in the karst rocky desertification ecosystem of Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 1358–1365. (in Chinese with English abstract) [王霖娇, 盛茂银, 杜家颖, 温培才 (2017) 西南喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学报, 37, 1358–1365.]
- Wang SJ, Liu QM, Zhang DF (2004) Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation and Development*, 15, 115–121.
- Wang WQ, Xu LL, Zeng CS, Tong C, Zhang LH (2011) Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios along live plant-litter-soil systems in estuarine wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 7119–7124. (in Chinese with English abstract) [王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海 (2011) 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 31, 7119–7124.]
- Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD (2004) Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 305, 509–513.
- Yuan DX (1991) Karst of China. Geological Publishing House, Beijing.
- Zeng ZX, Wang KL, Liu XL, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Zhang H, Du H (2015) Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of North-west Guangxi. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 682–693. (in Chinese with English abstract) [曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎 (2015) 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 39, 682–693.]
- Zhao YF, Xu FL, Wang WL, Wang LL, Wang GX, Sun PY, Bai XF (2014) Seasonal variation in contents of C, N and P and stoichiometry characteristics in fine roots, stems and needles of *Larix principis-rupprechtii*. *Chinese Bulletin of Botany*, 49, 560–568. (in Chinese with English abstract) [赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 王国兴, 孙鹏跃, 白小芳 (2014) 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化. 植物学报, 49, 560–568.]
- Zhang W, Wang KL, Chen HS, Zhang JG (2012) Use of satellite information and GIS to predict distribution of soil organic carbon in depressions amid clusters of karst peaks. *Acta Pedologica Sinica*, 49, 601–606. (in Chinese with English abstract) [张伟, 王克林, 陈洪松, 张继光 (2012) 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究. 土壤学报, 49, 601–606.]

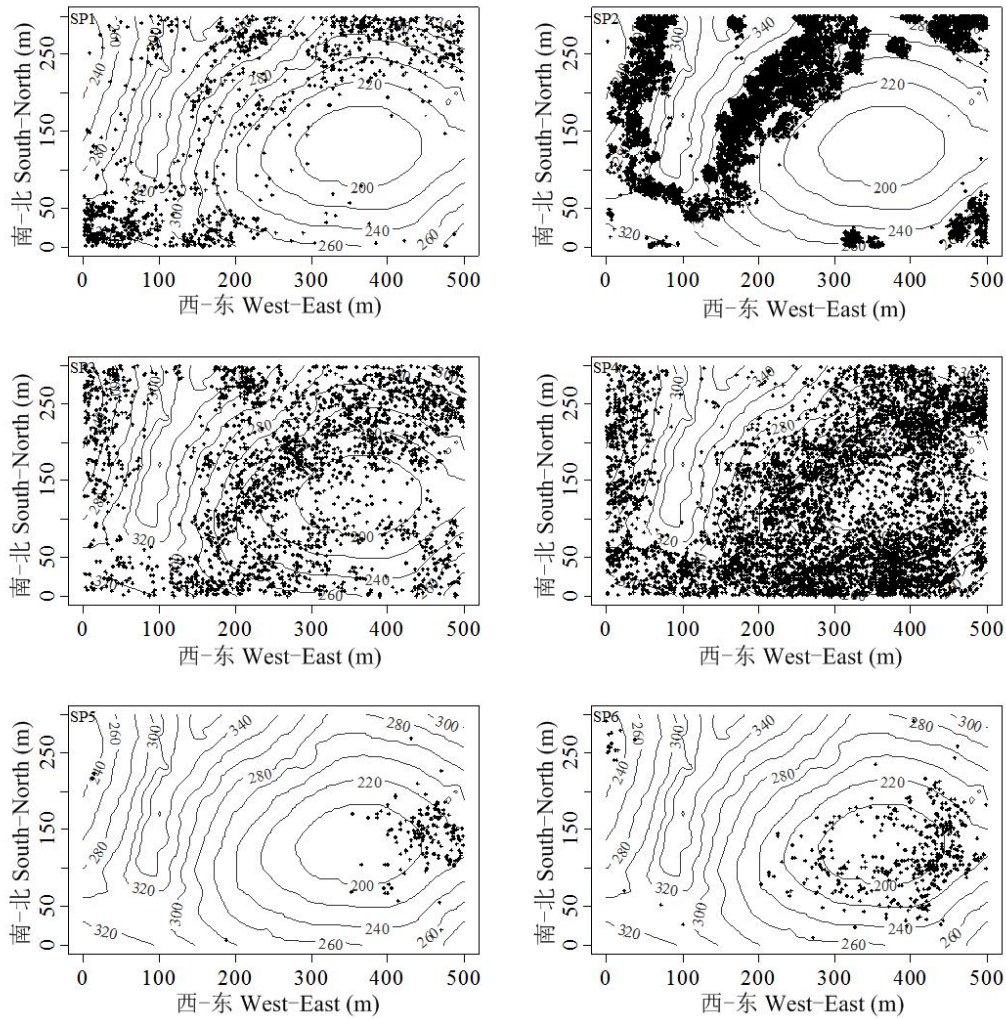
(责任编辑: 曹坤芳 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 弄岗15 ha森林动态监测样地6个常见树种的空间分布

Appendix 1 Spatial distribution of six common tree species of the 15 ha forest dynamics plot in Nonggang, Guangxi

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2017148-1.pdf>



附录 1 弄岗 15 ha 森林动态监测样地 6 个常见树种的空间分布。物种编号见表 1。
Appendix 1 Spatial distribution of six common tree species of the 15 ha forest dynamics plot in
Nonggang, Guangxi. The six tree species are the same as in Table 1.