

DOI: 10.5846/stxb202105271396

王怀宾, 胥晓, 杨万勤, 曹瑞, 王芝慧, 郑冰倩, 吕浩池, 刘婷婷. 城市园林不同生活型植物叶片碳、氮、磷生态化学计量特征及其对台风的响应. 生态学报, 2021, 41(22): 8931-8938.

Wang H B, Xu X, Yang W Q, Cao R, Wang Z H, Zheng B Q, Lü H C, Liu T T. The ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in urban garden plants with different life forms and its response to typhoon Hagupit. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8931-8938.

城市园林不同生活型植物叶片碳、氮、磷生态化学计量特征及其对台风的响应

王怀宾^{1,2,3}, 胥 晓^{1,3}, 杨万勤^{2,*}, 曹 瑞², 王芝慧², 郑冰倩², 吕浩池², 刘婷婷^{1,3}

1 西华师范大学生命科学学院, 南充 637009

2 台州学院生命科学学院, 台州 318000

3 西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 南充 637009

摘要:植物碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量比对于维持植物的正常生长发育具有重要意义。台风可能通过多种途径影响我国沿海城市园林植物的生长发育,并改变园林植物C、N、P含量及其生态化学计量特征。然而,相关研究鲜有报道,亟待深入。因此,在2020年8月黑格比台风登陆我国浙江省前后,我们对比研究了台风来临前、台风影响期间以及台风过境一周后,台州市主城区常见的乔、灌、草园林植物叶片C、N、P含量及其生态化学计量比变化特征。结果表明:(1)乔、灌、草园林植物叶片的C/N分别为 27.3 ± 0.6 、 42.9 ± 1.4 、 25.4 ± 2.2 ,C/P分别为 208.8 ± 9.3 、 194.1 ± 9.6 、 88.5 ± 5.7 ,N/P分别为 7.7 ± 0.4 、 4.9 ± 0.2 、 4.2 ± 0.5 ,表明研究区域城市园林植物受到N的限制。(2)不同生活型的园林植物叶片C、N、P含量受台风的影响存在不同程度的差异。C与N含量受台风的影响程度均表现为草本>灌木>乔木,P含量受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木。(3)不同生活型的园林植物叶片C、N、P生态化学计量比对台风的响应存在差异。C/N受台风的影响程度表现为草本>灌木>乔木,C/P受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木,而N/P受台风的影响程度表现为乔木>草本>灌木。台风影响一周后,乔、灌、草园林植物叶片C、N、P含量及生态化学计量比能够自我调节进行恢复。可见,台风会对不同生活型的园林植物叶片基础元素含量及生态化学计量比产生不同程度的影响,而园林植物可通过自身内稳态调节机制使台风的影响减小到最低。

关键词:台风干扰;化学计量比;城市园林植物;内稳态;滨海城市

The ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in urban garden plants with different life forms and its response to typhoon Hagupit

WANG Huaibin^{1,2,3}, XU Xiao^{1,3}, YANG Wanqin^{2,*}, CAO Rui², WANG Zhihui², ZHENG Bingqian², LÜ Haochi², LIU Tingting^{1,3}

1 School of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China

2 School of Life Sciences, Taizhou University Taizhou 318000, China

3 Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation, Ministry of Education, Nanchong 637009, China

Abstract: The concentrations of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P), and their ecological stoichiometric ratios in plant tissues play an important role in maintaining the growth and development of plants. Although the typhoons could affect the growth and development of garden plants in coastal cities of China in many ways, the effects of typhoon on the ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in urban garden plants have not been demonstrated. Therefore, the concentrations of C, N and P in leaves of common garden trees, shrubs and herbs were

基金项目:国家自然科学基金项目(32071554)

收稿日期:2021-05-27; 接收日期:2021-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com

measured in Taizhou City, a coastal city in Zhejiang Province before one day, after one day and one week of Typhoon “Hagupit” in August 2020, respectively. Then, the short-term effects of typhoon “Hagupit” on the concentrations and stoichiometric ratios of C, N and P in these garden plant leaves were evaluated. The C/N ratio of the investigated garden trees, shrubs and herbs is 27.3 ± 0.6 , 42.9 ± 1.4 and 25.4 ± 2.2 , respectively; the C/P ratio is 208.8 ± 9.3 , 194.1 ± 9.6 , 88.5 ± 5.7 , respectively; and the N/P ratio is 7.7 ± 0.4 , 4.9 ± 0.2 , 4.2 ± 0.5 , respectively, implying that the investigated urban garden plants are limited by N. The concentrations of C, N and P in garden plant leaves of different life forms were affected by the typhoon to varying degrees, but the concentrations of the measured bioelements gradually recovered to the original level after one week of typhoon impact. Both C and N concentrations in plant leaves were affected by typhoon followed as herb > shrub > tree, while the concentration of P in plant leaves was affected by typhoon followed as herb > tree > shrub. The differential responses of C, N and P stoichiometric ratios in garden plants to the typhoon “Hagupit” were observed among different plant life forms. The ratio of C to N in plant leaves were affected by the typhoon followed as herb > shrub > tree, the ratios of C to P in plant leaves were affected by the typhoon followed as herb > tree > shrub, and the ratio of N to P in plant leaves were affected by the typhoon followed as tree > herb > shrub, respectively. After one week of the typhoon “Hagupit”, the concentrations and stoichiometric ratios of C, N and P in garden plants gradually recovered to the pre-typhoon level. In conclusion, the typhoon can have to a certain extent effects on C/N/P stoichiometry of garden plants of different life forms, and garden plants can minimize the impact of typhoon by regulating their homeostasis.

Key Words: typhoon disturbance; stoichiometric ratio; urban garden plants; homeostasis; coastal city

生态化学计量学是研究有机体主要组成元素间化学计量关系的学科^[1]。碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生长发育所必需的生物元素^[2],其生态化学计量特征不仅与植物群落多样性、养分利用效率、生产力等有重要联系^[3-4],而且还受到植物生活型、气候和土壤特性等的共同调节^[4]。同时,植物的生态化学计量特征也是植物体在变化生境中内稳态机制最直观的体现^[5]。这意味着,干扰植物生理生化过程的因素均可能直接或间接影响到植物 C、N、P 生态化学计量特征。因此,研究植物 C、N、P 生态化学计量特征对于干扰因子的响应可以为理解植物内稳态机制提供科学依据。

台风是热带或副热带洋面上的低压涡旋加强的结果,是一种强大而深厚的热带天气系统^[6]。普遍认为,台风是影响沿海地区植株生长^[7]、林分结构^[8]、群落演替^[9]、物质循环^[10]和水文过程^[11]等的重要干扰因子。一方面,台风携带巨大能量,强大风力会对植株产生机械性损伤,导致其产生一系列应激响应^[12];另一方面,伴随台风而来的充沛降水能够改变小区域尺度环境,对植株生命过程产生剧烈影响^[13]。此外,在全球气候变化背景下,台风强度和发生频率预计在未来继续呈上升趋势,这可能导致沿海森林受到台风影响程度逐渐加强^[14]。因此,我们推测台风可能通过直接或间接途径影响沿海城市园林植物的生理生化过程,从而改变园林植物 C、N、P 含量及其生态化学计量特征,但相关研究鲜有报道。

园林植物是维持和提高城市人居环境质量的关键成分^[15]。然而,我国海岸线狭长,沿海地区城市园林植物经常受到台风的干扰^[16]。因此,研究园林植物的 C、N、P 生态化学计量特征对台风的响应可从植物内稳态机制维持方面为城市生态管理提供科学依据。毗邻东海的台州市位于我国中亚热带东端的低山丘陵地区,受洋流、东亚季风的影响,海洋性气候特征显著,园林植物资源多样,森林覆盖率达 62.2 %^[17]。同时,台州也是受台风影响显著的区域。据统计,在 1949—2018 年中,共有 43 个台风登陆浙江,台州都会受到剧烈影响^[18]。当前,关于台风影响城市森林的研究多集中于台风灾害下城市森林群落结构的变化^[19-21]、城市森林中不同树种的受损程度的统计^[22]、树木抗风性的研究^[23]、以及城市森林被破坏的模型预测^[24-25]。然而,对于台风如何影响城市园林植物生物元素含量及生态化学计量特征知之甚少。因此,以台州市主城区园林植物为研究对象,研究台风对典型园林植物叶片 C、N、P 含量及其生态化学计量特征的影响,可为筛选出更适合栽培于滨海城市的园林植物、台风影响区的城市园林生态建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省台州市椒江区(28°63′—28°68′N, 121°38′—121°41′E), 地处甬台温沿海中部, 平原丘陵相间, 东濒东海, 属中亚热带季风区。受海洋水体调节和西北高山对寒流的阻滞, 气候温和湿润, 热量丰富, 年均日照时数 1800—2037 h。雨水充沛, 年平均降水超过 120 d, 年降水量 1185—2029 mm, 多年平均降水量 1632 mm。年平均气温为 14.8—23.8 °C, 最高气温 40 °C, 最低气温 -4 °C。主要乔木有香樟(*Cinnamomum camphora*)、垂柳(*Salix babylonica*)、全缘叶栎(*Koelreuteria bipinnata* var. *integrifoliola*)、无患子(*Sapindus saponaria*)、光叶榉(*Zelkova serrata*)等, 灌木包括红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)等, 草本主要有萱草(*Hemerocallis fulva*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菊科(Compositae)和禾本科(Gramineae)等植物。2020 年第 4 号台风黑格比(Typhoon Hagupit)于 2020 年 8 月 4 日凌晨以巅峰强度在浙江省乐清市登陆, 随后纵穿浙江省, 中心最大风力达 13 级, 台州受到强风和强降雨影响, 持续到 8 月 4 日 14:00 左右。

1.2 样品采集与测定

根据台风预警信息, 本研究于台风到达前一周(7 月 26 日)、台风过境 24 h 以内、以及台风过境 7 d, 在台州市椒江区采集典型乔木、灌木、草本植物共 11 个物种叶片, 并 0 °C 低温保存。

乔木植物叶片采集: 研究区内选取香樟、垂柳、全缘叶栎、无患子、光叶榉 5 个乔木优势种, 每一物种选取 5 棵生长于同一地段、正常生长、树龄相同、胸径基本相同的样木并做好标记, 使用高枝剪在样木树冠中层的东、南、西、北四面以及树冠顶端(或者靠近顶端位置)采集叶样本并分别均匀混合。

灌木植物采集: 研究区内选取红花檵木、女贞、杜鹃 3 个灌木优势种, 每一植株选取 5 棵处于同一地段且具有代表性、正常生长、年龄基本相同的样木并做好标记, 在灌木中层的东、南、西、北四面以及灌木顶端采集叶样本并分别均匀混合。

草本植物采集: 选取草本优势种萱草、鸢尾、百日菊(*Zinnia elegans*) 3 种, 在研究区草本样地内划分 5 个 1 m × 1 m 的样方, 采集样方内草本植物。在台风过境 24 h 以内、以及台风过境后 7 d 在已经做好标记的乔木、灌木、草本样方内以相同的方式采集叶片。

使用 TDR 150(Spectrum)测定台风前、中、后三个阶段的土壤含水量。将采集的植物叶片带回实验室, 取出一小部分称重后于 65 °C 烘箱中烘干至恒重再称重, 测定叶片含水量。其余样品 105 °C 杀青, 于 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 粉碎过 0.25 mm 孔径筛。植物叶片样本全 C 和全 N 含量使用全自动化学元素分析仪(Elementar Analysensysteme GmbH, German)测定; 全 P 含量采用钼锑抗比色法测定^[26]。

1.3 数据处理与统计分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对台风前后乔灌木叶片中 C、N、P 含量及其化学计量比进行显著性分析; 且当结果在 $\alpha = 0.05$ 水平显著时, 通过新复极差法(Duncan)进行多重比较。采用 Pearson 相关分析方法, 分析台风前后叶片和土壤水含量与乔灌木叶片 C、N、P 含量及其化学计量比之间的相关性, 显著性检验采用双尾检验。上述分析在 SPSS 20.0 软件中完成。采用广义线性模型(GLM, generalized linear models)分别分析台风事件对每个生活型园林植物叶片元素含量和化学计量比的影响。使用公式 $\ln(\text{Conc}) = \text{Time}$, 其中 Time 为台风事件的不同阶段, $\ln(\text{Conc})$ 为每个台风事件阶段的植物叶片元素含量或化学计量比^[27]。上述分析和相关图表在 R 软件 4.33 版本中完成^[28]。

2 结果与分析

2.1 台风前后不同生活型植物叶片 C、N、P 含量变化特征

园林植物叶片 C、N、P 含量受台风的影响程度因生活型而异(表 1)。C 含量和 N 含量受台风的影响程度

均表现为草本>灌木>乔木;P 含量受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木(表 1)。

同一生活类型,不同物种叶片 C、N、P 含量变化受台风影响程度也不同(图 1)。乔木物种中,光叶榉和垂柳叶片的 P 含量在台风期间显著降低,在台风一周后得到回升。而香樟叶片 P 含量变化与之相反(图 1)。灌木物种中,女贞叶片 N 含量在台风期间显著降低,在台风一周后回升(图 1)。草本物种中,萱草的 N 含量与百日菊的 N、P 含量在台风期间显著下降,在台风一周后回升(图 1)。而鸢尾 C 含量和萱草的 P 含量变化与之相反。

表 1 台风影响下台州市主城区不同生活型园林植物叶片碳、氮、磷含量及计量比的广义线性模型分析结果

Table 1 Summary of Generalized linear model analysis of different life forms foliar C, N and P concentrations and their stoichiometric ratios in Taizhou City

| 叶片养分化学计量特征 Leaf nutrient stoichiometry | 乔木 Tree | | 灌木 Shrub | | 草本 Herb | |
|-------------------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | 台风期间 During typhoon | 台风后 After typhoon | 台风期间 During typhoon | 台风后 After typhoon | 台风期间 During typhoon | 台风后 After typhoon |
| C | 0.018 | 1.634 | -1.346 | 1.792 * | 0.972 * | 1.162 ** |
| N | -0.030 | 0.018 | -0.048 | -0.048 | -0.654 *** | -0.470 *** |
| P | -0.040 | -0.025 | -0.013 | 0.007 | -0.477 *** | -0.074 |
| C/N | 0.708 | 0.757 | 0.832 | 5.597 | 11.259 *** | 7.115 *** |
| C/P | 18.62 | 17.49 | 7.374 | -0.032 | 16.131 ** | 9.384 * |
| N/P | 0.928 | 0.467 | 0.056 | -0.222 | -0.138 | -0.385 |

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

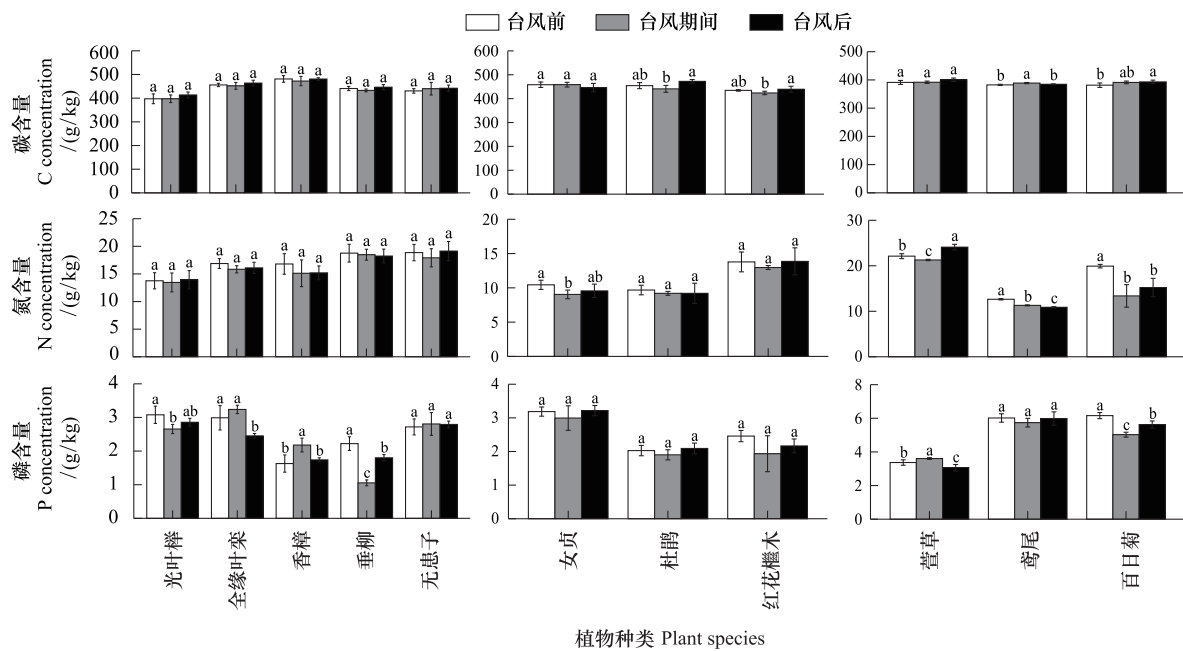


图 1 台州市主城区园林植物叶片碳氮磷含量在台风前后的变化(平均值±标准误)

Fig.1 Effects of typhoon on the concentrations of C, N and P in leaves of common garden plants in Taizhou City (mean±SD)

不同小写字母表示叶片元素含量在不同台风时期的差异显著($P < 0.05$);ZS:光叶榉 *Z. serrata*;KB:全缘叶栎 *K. bipinnata* var. *integrifoliola*;CC:香樟 *C. camphora*;SB:垂柳 *S. babylonica*;SS:无患子 *S. saponaria*;LL:女贞 *L. lucidum*;RS:杜鹃 *R. simsii*;LC:红花檵木 *L. chinense* var. *rubrum*;HF:萱草 *H. fulva*;IT:鸢尾 *I. tectorum*;ZE:百日菊 *Z. elegans*

2.2 台风前后不同生活型植物叶片化学计量比变化特征

园林植物叶片的 C、N、P 生态化学计量比对台风的响应因生活型而异(表 1)。C/N 受台风的影响程度表

现为草本>灌木>乔木;C/P 受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木;N/P 受台风的影响程度表现为乔木>草本>灌木(表 1)。

同一生活类型的不同物种,叶片 C、N、P 化学计量比对台风的响应也存在不同程度的差异(图 2)。乔木物种中,香樟叶片 C/P 和 N/P 在台风来临时显著降低,台风一周后回升,而垂柳叶片变化相反(图 2)。灌木物种中,女贞叶片 C/N 在台风来临时显著上升,台风一周后下降。草本物种中,萱草 C/P、N/P 在台风来临时降低,台风一周后回升,但萱草的 C/N 以及百日菊的 C/N 和 C/P 变化则相反(图 2)。

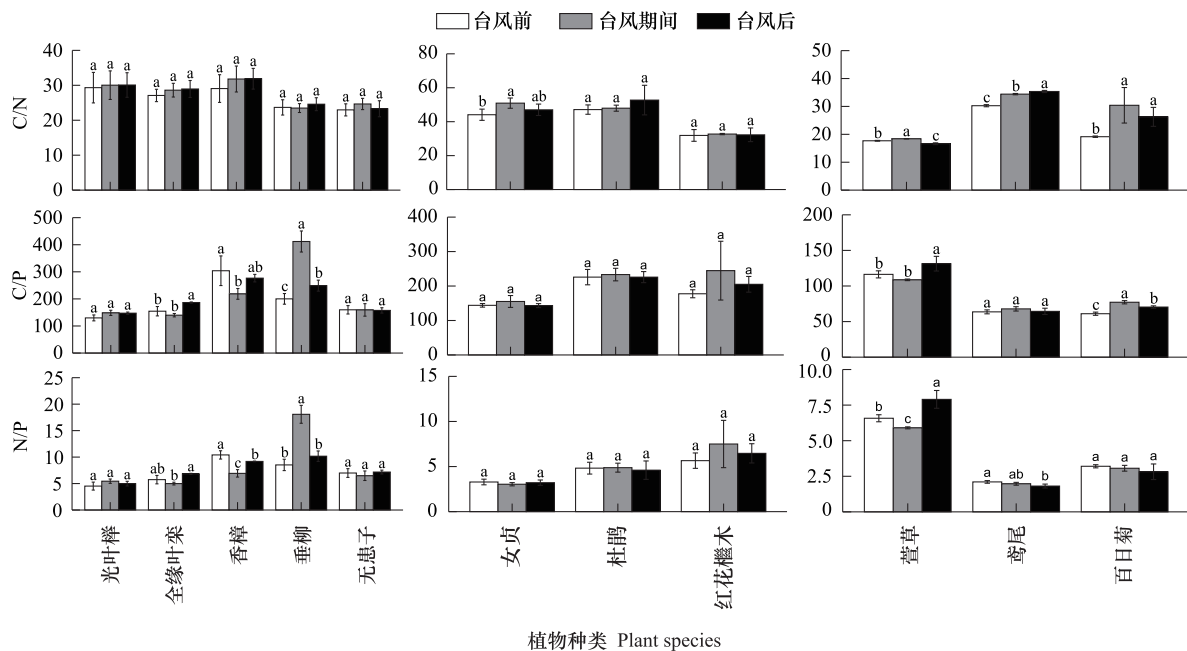


图 2 台州市主城区园林植物叶片碳氮磷化学计量比在台风前后的变化(平均值±标准误)

Fig.2 Influence of typhoon on the stoichiometry of C, N and P in leaves of common garden plants in Taizhou City (mean±SD)

2.3 土壤和叶片含水量与植物 C、N、P 含量及其生态化学计量比的关系

土壤含水量与乔木叶 C 含量呈显著负相关($P < 0.05$)。土壤含水量与草本植物 C 含量、N 含量、C/N 呈显著正相关,而与 N/P 呈显著负相关。叶片含水量与乔木叶 C 含量、N 含量、C/P、N/P 呈显著正相关,而与 P 含量、C/N 呈显著负相关。叶片含水量与灌木叶 C 含量、P 含量、C/N 呈极显著正相关,而与 N 含量、C/P、N/P 呈极显著负相关($P < 0.01$)(表 2)。由于日均温与植物叶片元素含量及生态化学计量比的相关关系不显著,因此在研究结果中未给出。

表 2 含水量与养分化学计量特征的 Person 相关性系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between moisture content and leaf nutrient stoichiometry

| 植物类型 Plant type | C | N | P | C/N | C/P | N/P |
|--------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 土壤含水量 Soil moisture content | | | | | | |
| 乔木 | -0.229 * | -0.072 | 0.054 | 0.158 | 0.008 | -0.032 |
| 灌木 | -0.289 | -0.112 | -0.146 | 0.056 | 0.199 | 0.089 |
| 草本 | 0.417 ** | 0.332 * | 0.154 | 0.515 ** | -0.204 | -0.332 * |
| 叶片含水量 Leaf water content | | | | | | |
| 乔木 | 0.299 * | 0.621 ** | -0.473 * | -0.498 ** | 0.394 ** | 0.530 ** |
| 灌木 | 0.451 ** | -0.429 ** | 0.606 ** | 0.456 ** | -0.506 ** | -0.584 ** |
| 草本 | -0.265 | -0.299 | 0.227 | 0.276 | -0.244 | -0.318 |

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

3 讨论

3.1 不同生活型植物叶片 C、N、P 含量对台风的响应

C 作为地球生命基本骨架,占到干物质的 50%左右,而 N、P 是蛋白质和遗传物质的主要组成元素,分别占其 16 %和 9.5 %^[3]。有研究表明,中国东部森林生态系统植物叶片 C、N、P 含量的均值分别为 480.1 mg/g、17.55 mg/g、1.28 mg/g^[29]。本研究中,乔木和灌木叶 C、N 含量均低于平均值,而所有植物类型的 P 含量高于平均值。与王亚军等^[30]对福州市常见园林植物调查结果刚好相反。主要原因可能是由于不同植物种的生物元素含量存在较大差异,不同区域的土壤营养元素的可利用性、环境因素存在差异^[31],以及不同生长阶段植物 C、N、P 含量及其化学计量特征都会发生改变^[32-33]。因此,在本研究区内选取的植物都属于同一批次移栽或者播种的园林植物,树高、胸径、树龄、生长状况基本一致,从而排除叶龄影响,以保证叶片元素含量及生态化学计量比的变化是由台风引起的。

植物叶片 C、N、P 含量受外界环境的影响是植物代谢能力与养分利用的综合反映^[34-35]。本研究中,不同生活型的园林植物叶片 C、N、P 含量受台风的影响存在不同程度的差异。C 含量与 N 含量受台风的影响程度都表现为草本>灌木>乔木,P 含量受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木。台风对植物叶片 C、N、P 含量造成的影响可能有以下原因:一方面,伴随台风而来的强降雨,改变水文、土壤环境^[36]。例如,Bertiller 等^[37]对南美洲巴塔哥尼亚高原多年生草本植物和灌木植物叶片 N、P 的分析发现,降水量减少,土壤水含量下降,草本植物叶片的 N 浓度逐渐增大,而灌木叶片的 P 浓度减小;另一方面,台风携带巨大能量对植物产生机械性损伤以及台风过后的植物自身恢复^[38],在强风天气会导致植物水分利用率下降,净光合速率降低,而蒸腾速率上升,在一定范围内风力越强,影响越大^[39]。此外,强风带来的机械性刺激会导致植物激素含量剧烈变化、水分运输状态改变、胞间信号传递被激活^[40],从而引起相关元素含量的变化。不同生活型的植物对台风响应不同,草本植物结构较乔木、灌木植物简单,可能在自身内稳态调节相对较弱,更容易受到台风影响。同一生活型植物不同物种间,对台风的响应程度也会不同,这可能是由于不同物种间体型、叶片郁闭程度、纤维化等方面的差异^[41]。

3.2 不同生活型园林植物叶片 C、N、P 化学计量比对台风的响应

环境因子对植物生理生态过程的影响,调节着植物对生物元素的吸收、贮存与消耗,从而表现出特定的生态化学计量特征。因此,植物中元素的生态化学计量特征能够指示植物对环境的生态响应与适应^[42]。植物叶片 C/N 和 C/P 能够体现植物对营养元素的吸收效率,越高的比例表明对该营养元素的吸收效率越高^[43-44]。本研究中,乔、灌、草的 C/N 分别为 27.3 ± 0.6 、 42.9 ± 1.4 、 25.4 ± 2.2 ,高于全球平均水平 (22.5 ± 10.6),C/P 分别为 208.8 ± 9.3 、 194.1 ± 9.6 、 88.5 ± 5.7 ,低于全球平均水平 (232 ± 145)^[3]。这表明,本研究中的园林植物 N 的利用效率高于全球植物,而 P 的利用效率低于全球植物的平均值。研究还发现,不同生活型的园林植物 C、N、P 生态化学计量比对台风的响应存在差异,C/N 受台风的影响程度表现为草本>灌木>乔木,C/P 受台风的影响程度表现为草本>乔木>灌木。不同生活型植物 C/N 受影响程度与 C 含量、N 含量受影响程度一致。C/P 受影响程度与 P 含量受影响程度一致,因此 C/P 的受影响程度取决于 P 含量。此外,在台风期间所统计的大部分园林植物叶片的 C/N 和 C/P 上升。可能的原因是,在不良环境中植物会提高对营养元素的吸收利用效率,从而导致 C 与营养元素的比值增大^[44];N 和 P 的利用率上升,可能是因为在剧烈变化的外界环境中,植物体内相关抗逆蛋白质的合成增加,从而提升植物体抵御外界环境影响的能力^[45]。

Güsewell 等^[46]研究表明,植物叶片 N/P 比值可以作为环境对植物养分状况限制的指标,陆地植物 $N/P < 10$ 时,植被受 N 限制,而 $N/P > 20$ 时,植被受 P 限制。然而,Koerselman 和 Meuleman (1996)对湿地生态系统的植物研究表明, $N/P < 14$ 时,植物受 N 的限制, $N/P > 16$ 的植物受 P 的限制^[47]。因此,在不同环境尺度下,N/P 表征植物受 N、P 元素限制的阈值存在不确定性^[48]。但也有研究表明,相比临界值 14 和 16,临界比为 10 和 20 更具可靠性^[49]。本研究中,乔木、灌木、草本植物 N/P 分别为 7.7 ± 0.4 、 4.9 ± 0.2 、 4.2 ± 0.5 ,表明在研究区

域内,园林植物主要受到 N 限制的影响。另外,在台风影响后,半数以上园林植物叶片 N/P 相比台风前上升,这表明台风会缓解该地区 N 限制的影响,可能是由于台风带来的丰沛降水大幅提升了土壤含水量,土壤湿度与土壤矿化速率正相关,土壤铵态氮含量随降雨量增加而显著增加^[50],加之植物在不良环境中吸收营养元素效率提升,因此在一定程度上缓解了该地区 N 限制。此外,在本研究中,不同生活型植物 N/P 受台风的影响程度表现为乔木>草本>灌木,表明园林乔木植物生长对该地区的 N 限制更加敏感。

3.3 不同生活型园林植物叶片 C、N、P 及化学计量比与土壤和叶片含水量的相关关系

伴随台风而来的是强降雨。水是生命新陈代谢过程的介质,土壤水含量^[51]、叶片水含量与植物光合等生理过程密切相关^[52],从而可能影响植物营养元素含量及化学计量比。本研究发现,土壤含水量与草本叶片元素含量的相关性更显著。土壤含水量增加,乔木叶 C 含量、N 含量降低而 P 含量升高,草本植物 C、N、P 含量都升高。而叶片含水量与乔木、灌木叶片元素含量相关性更显著。任书杰等^[53]研究发现,随着降水量或者人工灌溉量增加,植物叶片 C 含量随之增加。也有研究表明,随着降雨量和土壤含水量增加,植物叶片 C 含量减少,而 N、P 含量增加^[54]。这可能是由于不同生活型植物生存策略及结构差异所致^[55],水分在乔木和灌木的维管组织运输过程相比草本更加复杂,路程更加遥远。强风天气植物蒸腾作用提高^[27],乔木和灌木植物属于多年生木本在维持自身稳定性强于草本植物^[5],在外界环境变化时,植物体自身内稳态调节更强。因此,叶片水含量与其自身元素含量会存在显著相关性。一年生和两年生草本植物在应对外界环境变化时,个体内稳态较乔木、灌木差^[56],加之个体较小,新陈代谢速率加快,导致草本植物元素含量更易受到土壤含水量影响。

综上所述,沿海城市园林不同生活类型植物叶片 C、N、P 含量及化学计量比对台风产生不同程度的响应。从园林植物基本元素含量及其化学计量比受台风影响的角度看,台风过后园林植物会通过自我调节进行恢复且有些能够恢复到先前状态,不同生活型园林植物受台风影响稳定性由强到弱依次为乔木>灌木>草本。这些结果为认识植物内稳态调节机制以及为台州城市园林生态建设提供一定科学依据和新思路。

参考文献 (References):

- [1] 张丽霞,白永飞,韩兴国. N:P 化学计量学在生态学研究中的应用(英文). *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1009-1018.
- [2] 蒋龙,徐振锋,吴福忠,谭波,游成铭,李汉森,刘一霖,彭永翔,曾合州,杨万勤. 亚热带 3 种典型常绿森林土壤和植物叶片碳氮磷化学计量特征. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 759-767.
- [3] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, Mccauley E, Schulz K L. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [4] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere* // Princeton University Press 2002: 225-226.
- [5] Yu Q, Chen Q, Elser J J, He N, Wu H, Zhang G, Wu J, Bai Y, Han X. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability. *Ecology letters*, 2010, 13(11): 1390-1399.
- [6] 王存忠. 台风名词探源及其命名原则. *科技术语研究*, 2006, 8(2): 58-63.
- [7] Zhang C, Qian W H, Song L, Xu D X, Zhao Q. Evaluation of the efficiency of the imperative ecological remediation regarding tree growth, root development, and edaphic properties after Typhoon Hato (2017) in Zhuhai, China *frontiers in bioscience-landmark*, 2021, 26(8): 312-321.
- [8] Taylor A R, Dracup E, Maclean D A, Boulanger Y, Endicott S. Forest structure more important than topography in determining windthrow during Hurricane Juan in Canada's Acadian Forest. *Forest Ecology and Management*, 2019, 434: 255-263.
- [9] Zong S, He H, Liu K, Du H, Wu Z, Zhao Y, Jin H. Typhoon diverged forest succession from natural trajectory in the treeline ecotone of the Changbai Mountains, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2018, 407: 75-83.
- [10] 周光益. 台风暴雨对热带林生态系统地球化学循环的影响. *北京林业大学学报*, 1998, 20(6): 40-44.
- [11] 周光益,陈步峰,曾庆波,吴仲民,李意德,林明献. 台风和强热带风暴对尖峰岭热带山地雨林生态系统的水文影响研究. *生态学报*, 1996, 16(5): 555-558.
- [12] 张琳琳,赵晓英,原慧. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(12): 1349-1353.
- [13] 任福民,Byron G, David E. 1957-1996 台风对中国降水的影响(英文). *大气科学进展*, 2002, 19(5): 943-952.
- [14] 蔡章林,吴仲民. 极端天气事件对森林生态系统的影响. *热带林业*, 2020, 48(1): 44-49,43.
- [15] Jim C Y, Chen W Y. Ecosystem services and valuation of urban forests in China. *Cities* 2009, 26(4): 187-194.
- [16] 王樟华,王希华,沈国春. 台风干扰对天童常绿阔叶林凋落物量的影响. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 79-89.
- [17] 林丽. 60 年沧桑巨变千里海疆一片绿——台州市沿海防护林建设 60 年历程. *浙江林业*, 2009(10): 20-21
- [18] 董加斌,黄新晴. 登陆浙江的台风路径分类和暴雨落区分析. *浙江气象*, 2019, 40(3): 13-19.
- [19] Foran C M, Baker K M, Narcisi M J, Linkov I. Susceptibility assessment of urban tree species in Cambridge, MA, from future climatic extremes.

- Environment Systems and Decisions, 2015, 35(3): 389-400.
- [20] Xi W M, Peet R K, Lee M T, Urban, D L. Hurricane disturbances, tree diversity, and succession in North Carolina Piedmont forests, USA. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1): 219-231.
- [21] 陈星澄, 宋磊, 赵庆, 许东先, 章驰, 钱万惠, 唐洪辉. 台风对粤港澳大湾区城市森林群落结构的影响. *林业与环境科学*, 2021, 37(2): 12-20.
- [22] 魏玉晗, 魏丹, 文才臻, 张耕, 代色平, 杨海燕. 台风灾害对广州市宫粉紫荆等绿化树种的影响分析——以台风“山竹”为例. *林业与环境科学*, 2020, 36(3): 86-91.
- [23] 高育慧, 毛君竹, 曾鹏飞, 李军娟, 宫彦章, 申凯歌, 王业春. 基于层次分析法的深圳市绿化树种抗风性评价——以台风“山竹”为例. *林业与环境科学*, 2019, 35(4): 97-105.
- [24] Klein R W, Koeser A K, Kane B, Landry S M, Shields H, Lloyd S, Hansen G. Evaluating the Likelihood of Tree Failure in Naples, Florida (United States) Following Hurricane Irma. *Forests*, 2020, 11(485): 1-10.
- [25] Thompson B K, Escobedo F J, Staudhammer C L, Matyas C J, Qiu Y. Modeling hurricane-caused urban forest debris in Houston, Texas. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(3): 286-297.
- [26] 汤国庆, 吴福忠, 杨万勤, 王壮, 汪沁, 梁子逸, 常晨晖, 李俊. 高山森林林窗和生长基质对苔藓植物氮和磷含量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1133-1139.
- [27] Lefcheck, Jonathan S. Piecewise SEM: Piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(5): 573-579.
- [28] R Development Core Team, 2018. R: a language and environment for statistical computing.
- [29] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [30] 王亚军, 郁珊珊. 城市绿化植物-凋落物-土壤系统碳氮磷化学计量特征研究. *西北植物学报*, 2017, 37(1): 171-180.
- [31] 王振南, 杨惠敏. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应. *草业科学*, 2013, 30(6): 927-934.
- [32] Yang Y, Luo Y, Meng L, Han W. Terrestrial C:N stoichiometry in response to elevated CO₂ and N addition: a synthesis of two meta-analyses. *Plant and Soil*, 2011, 343(1-2): 393-400.
- [33] 王冬梅, 杨惠敏. 4 种牧草不同生长期 C、N 生态化学计量特征. *草业科学*, 2011, 28(6): 921-925.
- [34] Han W, Fang J, Guo D, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [35] Ågren G. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153-170.
- [36] 胡波, 陈丽华. 黄土高原不同林地土壤水分特征及影响因子通径分析. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(1): 79-86.
- [37] Bertiller M B, Sain C L, Carrera A L, Vargas D N. Patterns of nitrogen and phosphorus conservation in dominant perennial grasses and shrubs across an aridity gradient in Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62: 209-223.
- [38] Walker B, Part A. Special issue: ecosystem, summary of the effects of Caribbean hurricanes on vegetation. *Biotropica*, 1991, 23: 442-447.
- [39] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 刘家琼. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 53-58.
- [40] 王艳红, 何维明, 于飞海, 江洪, 余树全, 董鸣. 植物响应对风致机械刺激研究进展. *生态学报*, 2010, 30(3): 794-800.
- [41] 奚为民, 陶建平, 李旭光. 强风干扰对森林生态系统的复杂影响: 研究进展和未来展望 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1). 2009: 20.
- [42] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 郭茹, 杨士梭. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应. *生态学报*, 2016, 36(20): 6420-6430.
- [43] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [44] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *American Naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.
- [45] 何凌仙子, 贾志清, 刘涛, 李清雪, 张友焱, 冯莉莉, 荆凯悦, 杨德福, 赵雪彬. 植物适应逆境胁迫研究进展. *世界林业研究*, 2018, 31(02): 13-18.
- [46] Güsewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2010, 164(2): 243-266.
- [47] Willem K, Meuleman, Arthur F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [48] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [49] Yan Z B, Tian D, Han W X, Tang Z Y, Fang J Y. An assessment on the uncertainty of the nitrogen to phosphorus ratio as a threshold for nutrient limitation in plants. *Annals of Botany*, 2017, 120(6): 937-942.
- [50] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征. *生态学报*, 2020, 40(19): 7000-7008.
- [51] 刘英, 雷少刚, 程林森, 程伟, 卞正富. 采煤塌陷影响下土壤含水量变化对柠条气孔导度、蒸腾与光合作用速率的影响. *生态学报*, 2018, 38(9): 3069-3077.
- [52] 冯晓钰, 周广胜. 夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系. *生态学报*, 2018, 38(1): 177-185.
- [53] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 官丽莉, 方华军, 姜春明. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr.) 叶片养分的空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29(4): 1899-1906.
- [54] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 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*, 2011, 35(6): 587-595.
- [55] 曹嘉瑜, 刘建峰, 袁泉, 徐德宇, 樊海东, 陈海燕, 谭斌, 刘立斌, 叶铎, 倪健. 森林与灌丛的灌木性状揭示不同的生活策. *植物生态学报*, 2020, 44(7): 715-729.
- [56] 张婷婷, 刘文耀, 黄俊彪, 胡涛, 汤丹丹, 陈泉. 植物生态化学计量内稳性特征. *广西植物*, 2019, 39(5): 701-712.