

中国东部城市森林阔叶树种叶绿素含量空间特征及其影响因素*

吴新辉 郭钰滢 夏楠 唐杨 郭泓伯 王洋 杜恩在[†]

(北京师范大学地理科学学部, 100875, 北京)

摘要 选取中国东部样带 9 个城市 27 个公园, 在生长季使用叶绿素仪(SPAD-502 Plus)测定了主要阔叶树种新叶与成熟叶的叶绿素相对含量(SPAD 值), 探究了城市阔叶树种叶片叶绿素相对含量空间特征及其影响因素. 结果表明: 中国东部城市阔叶树种成熟叶 SPAD 值显著高于新叶, 常绿阔叶树种叶片 SPAD 值显著高于落叶阔叶树种, 中国东部城市阔叶树种新叶和成熟叶的叶绿素相对含量均随纬度降低而升高, 主要是由树种组成(以常绿树种比例为指标)变化导致的. 本研究相关结果增进了对城市环境中阔叶树种叶片属性大尺度空间规律的认识.

关键词 城市森林; 木本植物; 叶绿素含量; 功能属性; 新叶; 成熟叶

中图分类号 P935.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021210

叶绿素是植物叶绿体内参与光合作用的重要色素, 它能够捕获光子的能量以推动氧化还原反应, 固定大气中二氧化碳, 形成有机碳水化合物以供给植物自身生长发育^[1]. 叶绿素含量作为叶片重要的功能性状, 对植物的固碳和释氧能力有显著影响^[2]. 植物功能性状与生态系统服务关系密切^[3-4], 研究城市木本植物叶片叶绿素含量特征对于理解城市森林的生态系统服务和生态效益有重要意义.

植物叶片叶绿素含量既受植物生长特性及叶龄影响, 也受到温度、降水等气候因子的调控^[5-9]. 例如: 温度通过影响酶促反应影响叶绿素合成, 一般植物叶片叶绿素合成的最佳温度为 30 °C^[10], 温度过高和过低都会抑制酶反应; 水分条件影响叶绿体的光化学活性, 叶片缺乏水分会影响叶绿素的合成, 促进叶绿素的分解^[11]. 目前, 对自然生态系统中植物叶片叶绿素含量的相关研究表明, 不同生活型植物叶片叶绿素含量差异显著, 而气候因素对叶绿素含量的空间变化解释率较低^[12-13].

与自然生态系统不同, 城市森林会受到大气污染、热岛效应等因素的影响^[14]. 城市中较高质量浓度的大气污染物会对植物叶片造成生理损害, 降低其叶绿素含量. 例如, O₃ 污染会导致植物叶片损伤, 由于解剖结构不同, 成熟叶受害程度通常较新叶更严重^[15]. SO₂ 质量浓度较高时, 短时间暴露即可引起叶绿素含量下

降^[16]. 苏行等^[17]的研究表明, 广州市白兰叶片的叶绿素含量随采样点大气污染指数的升高而下降. 王会霞等^[18]发现在大气受到污染的环境中, 植物叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 均遭到不同程度破坏, 导致总叶绿素含量下降. 此外, 朱济友等^[19]研究发现, 在城市热岛效应严重的区域, 植物叶片叶绿素含量显著增加. 上述研究表明, 城市环境在小尺度上是影响植物叶片叶绿素含量的重要因素. 然而, 对于城市中木本植物叶片叶绿素含量的大尺度空间格局和影响因素, 仍缺乏深入研究.

SPAD-502 Plus 叶绿素仪基于叶绿素对有色光的吸收特性, 通过测量叶片在 2 种波长(650、940 nm)内的透光系数定量指示叶绿素相对含量(SPAD)^[20], 可在野外快速、准确、无损地对叶片叶绿素相对含量进行测定^[21]. 姜丽芬等^[22]测定了落叶松人工林下 4 种阔叶树种 SPAD 值的季节变化, 并与分光光度法测定的叶绿素含量进行相关性分析, 结果表明 SPAD 值能较好地反映树木叶绿素含量的变化. Delegido 等^[6]、王凯等^[23]、李海云等^[24]和缪绅裕等^[25]分别对多种木本植物的 SPAD 值和叶绿素含量进行比较分析发现, 木本植物的 SPAD 值与叶绿素含量之间有很强的正相关性, 因此可以很好地指示叶绿素含量的变化. 本研究选取中国东部样带 9 个城市 27 个城市公园, 使用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪原位测定主要阔叶树种新叶与成熟叶 SPAD 值, 探究了其空间格局特征及影响因素.

* 地表过程与资源生态国家重点实验室自由探索资助项目(2021-TS-02)、国家自然科学基金资助项目(41877328)

[†] 通信作者: 杜恩在(1986—), 男, 副教授. 研究方向: 生物地球化学与森林生态学. E-mail: enzaidu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-08-28

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况 选择中国东部样带 9 个城市进行采样, 从北到南依次包括哈尔滨、长春、沈阳、北京、石家庄、郑州、合肥、南昌和广州(表 1)。研究区域横跨中温带、暖温带和亚热带地区, 具有明显的温度和降水梯度, 年均温 6.3~22.5℃, 年降水量为 500~2 353 mm。城市原始土壤类型涵盖半淋溶土、半水成土、淋溶土等。该研究区域是我国乃至世界人口最为密集、经济发展最为迅速的区域之一, 城市环境受人为活动影响较大, 空气污染较为严重^[26-27](表 1)。

1.2 城市阔叶树种 SPAD 值测定 植物叶片 SPAD

值测定及样品采集于 2019 年 7—8 月进行。在每个城市的中心区域选择 3 个代表性公园(表 1), 在每个公园的森林斑块内选择所有阔叶树种进行叶片采集和 SPAD 值测定, 同一树种随机选择 3 个健康植株作为重复。采集冠层上方无病虫害, 生长良好的 3 个向阳小枝, 结合叶序和生长状况选择顶端生长的 3~4 片叶作为新叶, 发育完全的成熟功能叶作为成熟叶, 使用 SPAD-502 Plus 叶绿素仪(Konica-Minolta, Japan)测定新叶与成熟叶的 SPAD 值, 其读数范围为 0~99.9, 量纲为一^[20]。共测得 281 个阔叶树种样本的叶片 SPAD 值, 其中常绿阔叶树 51 种, 落叶阔叶树 122 种(详见表 1)。

表 1 采样点概况

城市	采样点	纬度/(°)N	经度/(°)E	年均温/℃	年降水量/mm	$\rho(\text{NO}_2)$ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho(\text{SO}_2)^{1)}$ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	AOT40 ²⁾ / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1})$	原始土壤类型	采样木本植物数量
哈尔滨	植物园	45.71	126.65	6.3	607	28.1	8.4	9.5	半水成土	34
	清滨公园	45.73	126.62							
	儿童公园	45.76	126.65							
长春	动植物园	43.86	125.33	7.7	731	32.6	4.3	12.3	半淋溶土	35
	南湖公园	43.86	125.30							
	儿童公园	43.88	125.32							
沈阳	标本公园	41.76	123.44	9.5	514	27.5	13.2	18.0	半水成土	37
	南湖公园	41.77	123.41							
	中山公园	41.78	123.40							
北京	农展馆	39.94	116.46	13.8	562	25.7	3.5	33.0	半淋溶土	31
	丰台花园	39.87	116.28							
	二十四节气公园	39.88	116.41							
石家庄	裕西公园	38.04	114.41	13.5	526	26.4	11.9	47.3	半淋溶土	33
	长安公园	38.05	114.51							
	花卉园	38.04	114.54							
郑州	人民公园	34.76	113.67	16.5	500	35.8	5.5	31.5	半水成土	36
	紫荆山公园	34.76	113.68							
	郑州之林	34.78	113.72							
合肥	生态公园	31.89	117.32	16.7	1 230	26.8	4.0	20.8	淋溶土	35
	古逍遥津	31.87	117.29							
	杏花公园	31.87	117.27							
南昌	人民公园	28.69	115.91	18.7	1 856	21.7	5.8	7.8	半水成土	34
	阳明公园	28.69	115.89							
	八一公园	28.68	115.89							
广州	天河公园	23.13	113.37	22.5	2 354	30.0	5.1	6.9	半水成土	35
	会展公园	23.10	113.35							
	珠江公园	23.13	113.34							

1) $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 为采样前1月的月均值; 2)AOT40为采样前1月累积值; 常绿物种比例为每个城市中常绿物种占有所有采样物种的比例。

1.3 城市环境因子数据获取 植物叶绿素含量可能受到气象、土壤及大气污染物等因素的影响,因此本研究着重分析了上述因子对中国东部城市阔叶树种叶绿素含量大尺度格局的影响.从中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)获取了 9 个城市日均温、日降水量数据,分别计算采样前 1 个月的月均温与月降水.从中国环境监测总站获取(<http://www.cnemc.cn/>)9 个城市大气污染物(NO_2 、 SO_2 、 O_3)小时平均质量浓度数据,分别计算采样前 1 个月的 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 月均值,以及 $\rho(\text{O}_3) > 78.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (40 ppb) 的小时积累量 AOT40^[3].土壤类型数据来自中国科学院南京土壤研究所建立的中国土壤信息系统^[28],依据研究样点周边距离最近的、未受人类活动影响的背景土壤类型判定原始土壤类型.

1.4 数据分析 SPAD 数据进行对数转换以满足正态分布,使用 Pearson 卡方正态检验来检验数据分布的正态性.使用配对 t 检验 (paired sample t -test) 检验新叶与成熟叶 SPAD 值的差异.使用 Wilcoxon 秩和检验分析新叶与成熟叶、落叶与常绿树种 SPAD 值的差

异.在同一城市内,对所有树种叶片 SPAD 值进行几何平均,使用局部加权回归 LOESS 分析叶绿素含量的纬度变化特征.为分析影响 SPAD 值空间变化的关键因素,首先基于线性模型分析 SPAD 值与常绿树种比例、气候因子、大气污染物及土壤类型的关系,进而筛选最优多元线性回归模型.统计分析均基于 R 软件 (3.4.0 版本; <https://www.r-project.org/>) 进行.

2 结果

2.1 中国东部城市阔叶树种叶片 SPAD 值基本特征

中国东部城市阔叶树种新叶与成熟叶 SPAD 值符合对数正态分布 (新叶 $P = 0.12$, 成熟叶 $P = 0.13$). 配对 t 检验结果表明,成熟叶 SPAD 值 (几何均值 49.31) 显著高于新叶 (几何均值 45.18) ($P < 0.05$) (图 1). 不同生活型树种的叶片 SPAD 值存在显著差异,常绿阔叶树种新叶、成熟叶 SPAD 值均显著高于落叶阔叶树种 ($P < 0.001$) (图 2). 2 种生活型阔叶树种成熟叶 SPAD 值均显著大于新叶 (图 2).

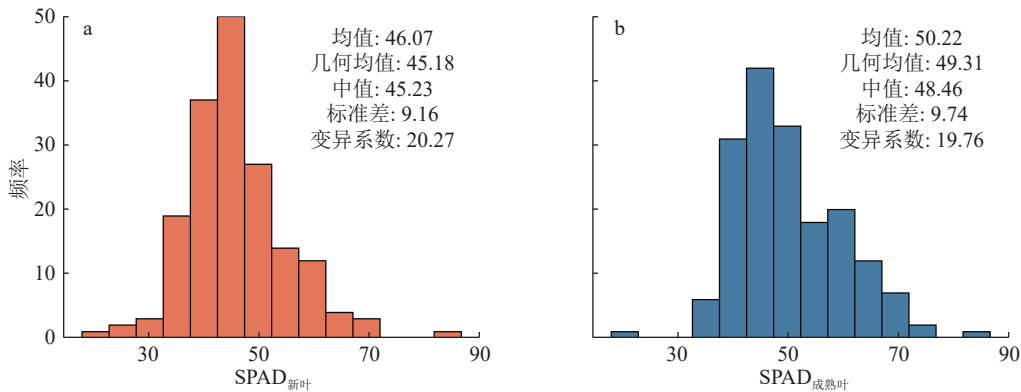


图 1 中国东部城市阔叶树种新叶 (a) 和成熟叶 SPAD 值 (b) 频率分布

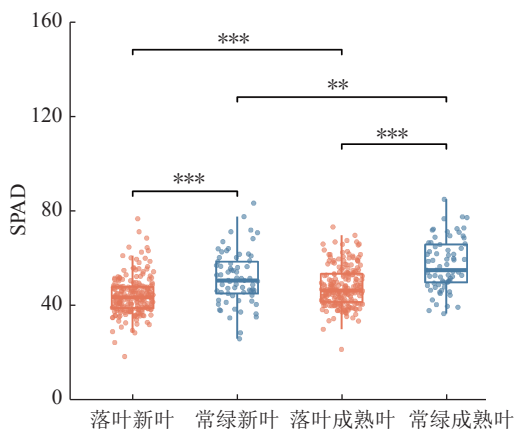


图 2 不同生活型 (落叶、常绿) 阔叶树种新叶与成熟叶 SPAD 值差异 (** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)

2.2 中国东部城市阔叶树种叶片 SPAD 值纬度格局及其影响因素 在城市尺度上,中国东部城市阔叶树

种新叶、成熟叶 SPAD 值均随纬度的升高而降低 (图 3). 常绿树种比例 (图 4-a、d)、采样前月降水量 (图 4-c、f) 均与阔叶树种 SPAD 均值呈显著正相关,采样前月均温与 SPAD 均值无显著相关性 (图 4-b、e). 此外,大气污染物质量浓度及城市原始土壤类型与阔叶树种叶片 SPAD 均值关系均不显著. 逐步回归结果表明,阔叶树种新叶、成熟叶叶绿素相对含量大尺度空间格局主要受植物生活型变化 (以常绿树种比例作为量化指标) 影响 ($P < 0.001$).

3 讨论

3.1 中国东部城市阔叶树种新叶与成熟叶叶绿素相对含量的差异 本研究发现,中国东部城市常绿及落叶阔叶树种成熟叶 SPAD 值均显著高于新叶,这与自

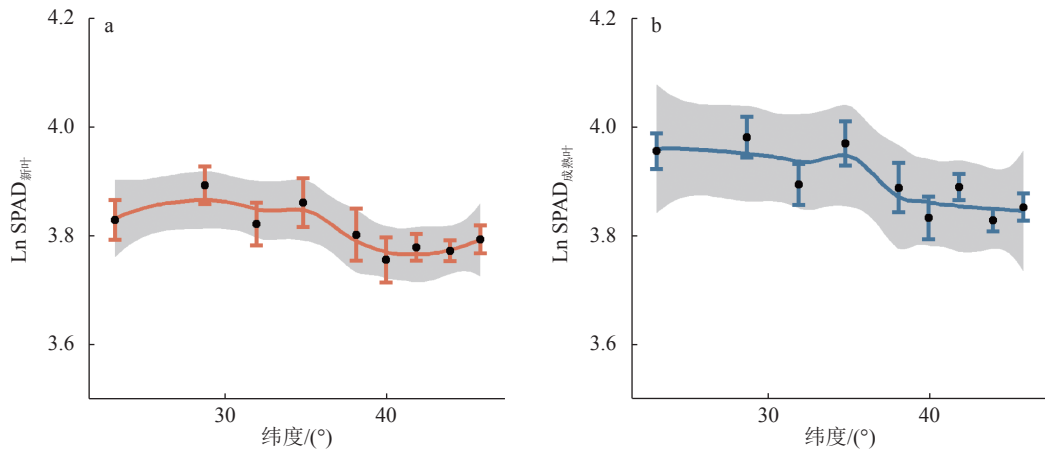


图 3 中国东部城市阔叶树种新叶(a)和成熟叶 SPAD 值(b)随纬度的变化

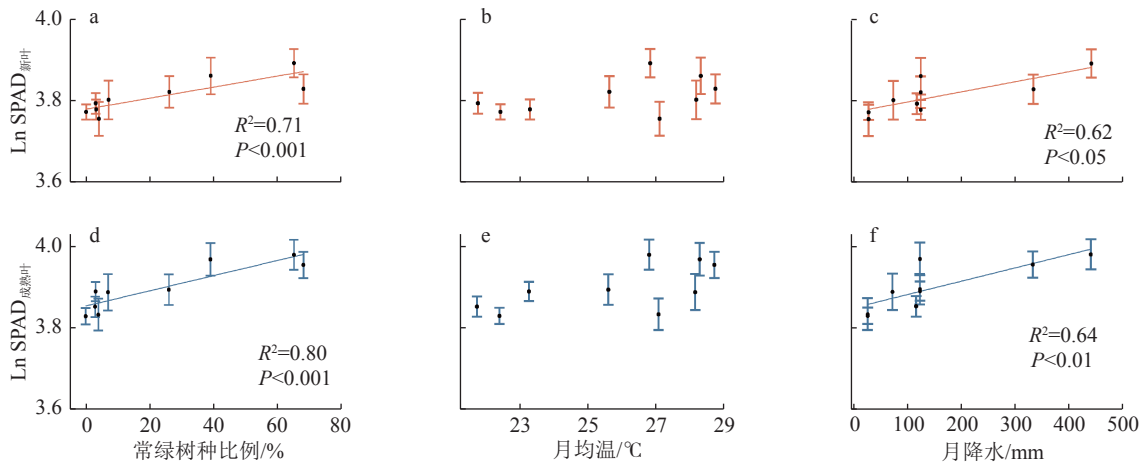


图 4 中国东部城市阔叶树种 SPAD 值与常绿树种比例(a、d)及气候因子(b、c、e、f)的关系

然生态系统中植物叶片叶绿素含量的研究结果一致^[29-30],可能是由于叶片在不同生长阶段的生理和形态结构差异所致^[31]。叶龄是反映叶片连续生命进程的重要指标^[32],新叶叶龄较小,叶色嫩绿,叶片功能尚不成熟^[33],叶绿体片层结构不发达^[34]。成熟叶发育成熟,叶片呈深绿色,对各种因素的逆境抵抗能力较强,叶绿体数量较多,叶绿素含量较高^[35]。

叶绿素含量与叶片厚度、叶片面质量(比叶重)等都是叶片的重要功能性状,且彼此相互关联^[36]。植物叶片厚度的变化直接影响叶片内栅栏组织的数量,较厚的叶片中栅栏组织细胞的层数较多,因而叶绿素面积含量更高^[37-38],且随着叶肉深度增加,叶绿素含量逐渐增加,在叶肉深处达到峰值^[39]。叶片面质量反映了植物的光合碳同化能力,与叶绿素含量显著正相关^[40-41],叶片密度和厚度决定了阔叶树种面质量的大小^[42]。新叶以伸展生长为主,细胞壁薄且细胞液多,叶片水分含量高,干物质含量低,因而其面质量较小,叶绿素面积含量较低。与之相反,成熟叶叶片较厚,栅栏组织发达,干物质含量高,面质量较大,叶绿素面积

含量较高^[43]。

3.2 中国东部城市不同生活型阔叶树种叶绿素相对含量的差异 本研究结果表明,叶片 SPAD 值在不同生活型树种间存在显著差异,新叶与成熟叶 SPAD 值均表现为常绿树种显著高于落叶树种,这与自然生态系统中 2 种生活型植物叶绿素含量的规律一致^[12]。Li 等^[13]通过对中国东部南北样带森林生态系统叶绿素含量的研究发现,叶绿素 a、叶绿素 b 含量及二者总和均为常绿植物显著高于落叶植物。Croft 等^[44]通过分析全球植物叶片叶绿素含量发现,在阔叶林、针叶林、灌木林及农田等植被类型中,常绿阔叶林叶片叶绿素含量最高。

不同生活型植物叶片功能属性的差异是植物自身遗传因素及其对生境适应的共同结果^[45]。常绿树种叶片具有较长的寿命,这要求其具备低的营养损失与高的营养储存能力^[46],叶片加厚有利于减少水分损失并固持养分,因而常绿植物的叶片一般较厚^[47],以更好地适应各种环境条件。同时,常绿植物高质量浓度的结构性碳水化合物成分通常导致其具有较大的面

质量^[48],也是使其叶绿素含量高于落叶植物的原因之一。

3.3 中国东部城市阔叶树种叶绿素相对含量空间变化及其影响因素 研究植物叶片功能性状的空间格局可以更好地认识大尺度上植物对环境的适应。本研究发现,城市木本植物叶片 SPAD 值随纬度升高逐渐降低。气温与常绿和落叶树种叶片 SPAD 值的直接关系均不显著,这可能是由于同一生活型木本植物叶片叶绿素含量存在种间差异,而且研究区生长旺季气候条件对植物叶绿素含量的限制作用较弱^[49-50]。此外,未发现大气污染物对中国东部城市阔叶树种叶片叶绿素空间格局造成显著影响,这可能是由于东部各城市间各种污染物质量浓度差异相对较小^[51],且城市植物长期受空气污染物的影响,叶片中抗坏血酸含量增加,植物对空气污染的耐受性提高^[52-54]。

本研究发现,常绿树种比例对中国东部城市阔叶木本植物叶片叶绿素含量空间变化的解释率最高。在较大的空间尺度上,纬度变化引起气候条件的空间变化,影响城市森林的树种组成,进而改变城市木本植物叶片叶绿素含量。根据群落构建理论^[55],物种对外界环境的适应性差异是群落内物种组成沿着环境梯度变化的主要原因^[56],中国东部城市从北到南,常绿阔叶树种比例增加,也是对环境适应性的结果。

在自然生态系统植物叶片属性大尺度空间格局研究中,同样也发现植物生活型对叶片属性空间变异的解释程度高于环境因素^[57]。Li 等^[13]通过对中国东部南北样带森林生态系统叶绿素含量的研究发现,气候和土壤因素并不是影响叶绿素含量的主要因素,它们的独立效应<1%。陈仲茁等^[58]对 3 种地带性森林植物叶片属性的分布规律研究发现,叶片属性的纬度差异主要是叶片对外界环境的适应性差异,也就是生活型导致的。王瑞丽等^[59]对中国东部南北样带 9 个森林生态系统的植物叶片功能属性的地理格局研究发现,植物生活型的空间分布解释了叶片功能属性较大一部分的纬度变异性。

4 结论

本研究基于叶片 SPAD 值,分析了中国东部城市阔叶树种的叶绿素相对含量特征及其影响因素。结果表明,阔叶树种成熟叶片 SPAD 值显著高于新叶,常绿阔叶树种叶片 SPAD 值显著高于落叶阔叶树种。中国东部城市阔叶树种叶片叶绿素含量随纬度升高而降低,主要是由常绿树种比例随纬度增加引起的。因此,在一定气候条件下,城市绿化树种配置对城市森林叶绿素含量及其生态功能有重要影响。目前已

有学者使用卫星数据反演城市植物叶片叶绿素与植被生产力^[60-61],今后可以综合地面调查测定与遥感等手段,将城市阔叶木本植物叶片叶绿素含量与光合速率及初级生产力的大尺度特征相结合,从而更好地定量认识城市森林生态系统服务的大尺度格局。

5 参考文献

- [1] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89
- [2] SACK L, GRUBB P J, MARAÑÓN T. The functional morphology of juvenile plants tolerant of strong summer drought in shaded forest understories in southern Spain[J]. Plant Ecology, 2003, 168(1): 139
- [3] ZHANG W W, FENG Z Z, WANG X K, et al. Elevated ozone negatively affects photosynthesis of current-year leaves but not previous-year leaves in evergreen *Cyclobalanopsis glauca* seedlings[J]. Environmental Pollution, 2014, 184: 676
- [4] LIU S N, YAN Z B, CHEN Y H, et al. Foliar pH, an emerging plant functional trait: biogeography and variability across Northern China[J]. Global Ecology and Biogeography, 2019, 28: 366
- [5] 王平荣,张帆涛,高家旭,等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 2009, 29(3): 629
- [6] DELEGIDO J, VAN WITTENBERGHE S, VERRELST J, et al. Chlorophyll content mapping of urban vegetation in the city of Valencia based on the hyperspectral NAOC index[J]. Ecological Indicators, 2014, 40(5): 34
- [7] DU E Z, DONG D, ZENG X T, et al. Direct effect of acid rain on leaf chlorophyll content of terrestrial plants in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605/606: 764
- [8] 吕丹,吴甘霖,邱东,等. 城市常绿园林植物香樟叶片色素变异特征研究[J]. 生物学杂志, 2019, 36(6): 59
- [9] ZHANG Y, LI Y, WANG R M, et al. Spatial variation of leaf chlorophyll in Northern Hemisphere grasslands[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1244
- [10] NAGATA N, TANAKA R, SATOH S, et al. Identification of a vinyl reductase gene for chlorophyll synthesis in *Arabidopsis thaliana* and implications for the evolution of prochlorococcus species[J]. Plant Cell, 2015, 17(1): 233
- [11] 汪本福,黄金鹏,杨晓龙,等. 干旱胁迫抑制作物光合作用机理研究进展[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(23): 5628
- [12] LI Y, HE N, HOU J, et al. Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2018, 6: 64
- [13] LI Y, LIU C C, ZHANG J H, et al. Variation in leaf

- chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: association with gross primary productivity[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 383
- [14] YAO R, WANG L C, HUANG X, et al. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 742
- [15] 程小云, 罗春旺, 刘琪璟, 等. 南昌近地层臭氧分布及其对敏感木本植物叶片的伤害[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(2): 211
- [16] MOLNÁR V É, TÓTHMÉRÉSZ B, SZABÓ S, et al. Urban tree leaves' chlorophyll-a content as a proxy of urbanization[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2018, 11(6): 665
- [17] 苏行, 胡迪琴, 林植芳, 等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 599
- [18] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市大气环境下绿化植物叶片比叶重和光合色素含量[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1134
- [19] 朱济友, 于强, 刘亚培, 等. 植物功能性状及其叶经济谱对城市热环境的响应[J]. *北京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(9): 72
- [20] MINOLTA C. Chlorophyll meter SPAD-502 instruction manual[M]. Osaka, Japan: Radiometric Instruments Operation, 1989: 17
- [21] 林婷婷, 王立, 张琳, 等. 不结球白菜叶绿素含量的主基因+多基因混合遗传分析[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(5): 34
- [22] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计SPAD-502在林业上应用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1543
- [23] 王凯, 吴祥云, 段海侠, 等. 辽西北主要绿化树种叶绿素含量分异特征及与SPAD值关系[J]. *植物研究*, 2014, 34(5): 634
- [24] 李海云, 任秋萍, 孙书娥, 等. 10种园林树木叶绿素与SPAD值相关性研究[J]. *林业科技*, 2009, 34(3): 68
- [25] 缪绅裕, 邓鸿英, 王厚麟, 等. 50种植物叶片绿色度和叶绿素含量相关性研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(1): 158
- [26] CHAN C K, YAO X. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1): 1
- [27] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1936
- [28] 史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究[J]. *土壤*, 2007, 39(3): 329
- [29] 叶倩, 刘志国, 蔡永立, 等. 福建梅花山57种常绿树叶片叶绿素特征分析[J]. *亚热带植物科学*, 2008, 37(2): 11
- [30] 理挪, 王培, PEGGY C A E, 等. 不同叶龄杉木叶片形态及光合特性分析[J]. *亚热带农业研究*, 2018, 14(3): 167
- [31] 杜宁, 张秀茹, 王炜, 等. 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6049
- [32] KIKUZAWA K, LECHOWICZ M J. Ecology of leaf longevity[M]. Tokyo, Japan: Springer, 2011: 41
- [33] 吴泽龙, 谭晓风, 袁军, 等. 油茶不同叶龄叶片形态与光合参数的测定[J]. *经济林研究*, 2016, 34(2): 24
- [34] 周会萍, 王晓冰, 徐鑫, 等. 红叶石楠不同叶龄叶片的光合特性研究[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(1): 39
- [35] SONG M B, TANG L P, ZHANG X L, et al. Effects of high CO₂ treatment on green-ripening and peel senescence in banana and plantain fruits[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(5): 875
- [36] REICH P B, UHL C, WALTERS M B, et al. Leaf lifespan as a determinant of leaf structure and function among 23 Amazonian tree species[J]. *Oecologia*, 1991, 86(1): 16
- [37] 雷蕾, 赵成章, 李雪萍, 等. 密度制约下杂海湿地黄帚橐吾叶绿素与叶面积、叶厚度间的关系[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3647
- [38] LIU C C, LI Y, XU L, et al. Variation in leaf morphological, stomatal, and anatomical traits and their relationships in temperate and subtropical forests[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5803
- [39] BORSUK A M, BRODERSEN C R. The spatial distribution of chlorophyll in leaves[J]. *Plant Physiology*, 2019, 180(3): 1406
- [40] 何春霞, 李吉跃, 张燕香, 等. 5种绿化树种叶片比叶重、光合色素含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 的开度与方位差异[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 134
- [41] 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 等. 神农架海拔梯度上4种典型森林的乔木叶片功能性状特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6420
- [42] NIINEMETS U. Components of leaf dry mass per area-thickness and density-alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plants[J]. *New Phytologist*, 1999, 144: 35
- [43] 薛立, 张柔, 奚如春, 等. 华南地区6种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 123
- [44] CROFT H, CHEN J M, WANG R, et al. The global distribution of leaf chlorophyll content[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111479
- [45] KIKUZAWA K, ONODA Y, WRIGHT I J, et al. Mechanisms underlying global temperature-related patterns in leaf longevity[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(8): 982
- [46] AERTS R. The advantages of being evergreen[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(10): 402
- [47] 张林, 罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 844
- [48] CASTRO-DIEZ P, PUYRAVAUD J P, CORNELISSEN J

- H. Leaf structure and anatomy as related to leaf mass per area variation in seedlings of a wide range of woody plant species and types[J]. *Oecologia*, 2000, 124(4): 476
- [49] CHEN X, HU B, YU R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China[J]. *Global Change Biology*, 2010, 11(7): 1118
- [50] 张有福, 陈春艳, 陈拓, 等. 2种圆柏属植物叶绿素荧光对季节变化的响应特征[J]. *植物研究*, 2010, 30(3): 289
- [51] GONG Z Z, ZHANG X P. Assessment of urban air pollution and spatial spillover effects in China: cases of 113 key environmental protection cities[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(6): 584
- [52] TRIPATHI A K, GAUTAM M. Biochemical parameters of plants as indicators of air pollution[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2007, 28(1): 127
- [53] THAWALE P R, BABU S S, WAKODE R R, et al. Biochemical changes in plant leaves as a biomarker of pollution due to anthropogenic activity[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1/2/3/4): 527
- [54] MUKHERJEE A, AGRAWAL M. Pollution response score of tree species in relation to ambient air quality in an urban area[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 96(2): 197
- [55] CHASE J M. Community assembly: when should history matter?[J]. *Oecologia*, 2003, 136(4): 489
- [56] ANDERSEN K M, ENDARA M J, TURNER B L, et al. Trait-based community assembly of understory palms along a soil nutrient gradient in a lower montane tropical forest[J]. *Oecologia*, 2012, 168(2): 519
- [57] HAN W X, CHEN Y H, ZHAO F J, et al. Floral, climatic and soil pH controls on leaf ash content in China's terrestrial plants[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(3): 376
- [58] 陈仲苗, 葛结林, 赵常明, 等. 中国东部3个地带性森林的叶片功能属性及其关联[J]. *植物科学学报*, 2020, 38(3): 347
- [59] 王瑞丽, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 中国森林叶片功能属性的纬度格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1735
- [60] WANG J, LU S Z, WANG W M, et al. Estimating vegetation productivity of urban regions using sun-induced chlorophyll fluorescence data derived from the OCO-2 satellite[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2019, 114: 102783
- [61] 韩红霞, 高峻, 刘广亮. 遥感和GIS支持下的城市植被生态效益评价[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2301

Spatial patterns and drivers of leaf chlorophyll content of broad-leaved woody plants across urban forests in eastern China

WU Xinhui GUO Yuying XIA Nan TANG Yang GUO Hongbo WANG Yang DU Enzai

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Leaf chlorophyll is associated with plant photosynthesis and vegetation productivity. Previous studies on leaf chlorophyll have mostly focused on plants in natural ecosystems, less is known about large-scale patterns and main drivers of leaf chlorophyll content for woody plants in urban forests. A chlorophyll meter (SPAD-502 Plus) was used to measure chlorophyll content (SPAD values) in both young and mature leaves of broad-leaved woody plants from 27 urban parks in 9 large cities across eastern China. Results showed that SPAD value was significantly higher in mature leaves than in young leaves, SPAD value of evergreen broadleaves was significantly higher than deciduous broadleaves. The chlorophyll content in young and mature leaves of broad-leaved woody plants in eastern China both decreased at higher latitude. The latitudinal variation in chlorophyll content in broad-leaved woody plants was mainly due to spatial shift in species composition (as indicated by percentage of evergreen species). These findings improve understanding of large-scale pattern of leaf chlorophyll content in urban forests.

Keywords urban forest; woody plant; chlorophyll content; functional traits; young leaf; mature leaf

【责任编辑:刘先勤】