

郑州市4种园林树木光合特性 及其影响因素研究

李喜梅, 赵君静, 回 祎, 黄 鑫, 高春雨, 牛雅璇, 廖晓宇, 于晨一

(河南农业大学林学院, 河南 郑州 450002)

摘要:【目的】以女贞(*Ligustrum lucidum*)、荷花玉兰(*Magnolia grandiflora*)、悬铃木(*Platanus orientalis*)、国槐(*Styphnolobium japonicum*)等4种郑州市常见园林树木为研究对象,比较了生理及环境因子对树木净光合速率的影响,为郑州市绿地生态建设及优选树种提供理论依据。【方法】分别测量4种园林树木在不同季节的光合特性、叶表滞尘量及生长环境的温度和湿度,从生理环境的角度出发,使用双因素方差分析比较了不同季节各树种的光合特性差异,通过广义线性混合模型和结构方程模型探讨了不同因子之间的相互作用及其对树种光合速率的影响。【结果】4种园林树木净光合速率在不同季节均存在显著性差异($P<0.05$),国槐的净光合速率显著高于其他树种,各树种夏季的净光合速率显著高于其他季节。生理因子(气孔导度和蒸腾速率)以及环境因素(滞尘量和湿度)与净光合速率有显著的相关关系($P<0.05$)。湿度对植物的净光合速率有最显著的直接作用和间接作用,是影响植物光合作用的关键环境因素。【结论】国槐的净光合速率高于其他树种,女贞、荷花玉兰的光合特性与环境、生理因素之间的相关性较强。

关键词:园林树木;光合特性;生理和环境因子;结构方程;郑州市

中图分类号:S718

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2024)05-0105-08



A study on photosynthetic characteristics and influencing factors of four kinds of garden trees in Zhengzhou

LI Ximei, ZHAO Junjing, HUI Yi, HUANG Xin, GAO Chunyu, NIU Yaxuan, LIAO Xiaoyu, YU Chenyi

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 【Objective】 Four common garden trees in Zhengzhou City, including *Ligustrum lucidum*, *Magnolia grandiflora*, *Platanus orientalis* and *Styphnolobium japonicum*, were selected as the study subjects. Our study provide a theoretical basis for the ecological construction of green space and the selection of tree species of Zhengzhou City from the perspective of physiological environment. 【Method】 Photosynthetic characteristics, leaf surface dust retention, and temperature and humidity of the growth environment were measured in different seasons to reveal the effects of physiological and environmental factors on net photosynthetic rate in the plants. Two-factor analysis of variance was used to compare the differences in photosynthetic characteristics of distinct species in different seasons. The interactions between different factors and their effects on plant photosynthetic rate were explored through generalized linear mixed models and structural equation models. 【Result】 There were significant differences in the net photosynthetic rate of the four garden trees in different seasons ($P<0.05$), and the net photosynthetic rate of *Styphnolobium japonicum* was significantly higher than that of other species. The net photosynthetic rate for each species was significantly higher in summer than in the other seasons. Physiological factors (stomatal conductance and transpiration rate) and environmental factors (dust retention and humidity) were significantly correlated with net photosynthetic rate ($P<0.05$). Humidity had the most significant direct and indirect effects on the net photosynthetic rate of plants and was the key environmental

收稿日期 Received: 2024-02-04

修回日期 Accepted: 2024-03-19

基金项目: 河南省科技攻关项目(242102320329)。

第一作者: 李喜梅(Liximei009@126.com), 副教授。

引文格式: 李喜梅, 赵君静, 回祎, 等. 郑州市4种园林树木光合特性及其影响因素研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 105-112. LI X M, ZHAO J J, HUI Y, et al. A study on photosynthetic characteristics and influencing factors of four kinds of garden trees in Zhengzhou[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(5): 105-112. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202402009.

factor affecting plant photosynthesis. 【Conclusion】 The net photosynthetic rate of *S. japonicum* is higher than that of other tree species, and there is strong correlation between environmental and physiological factors of *L. lucidum* and *M. grandiflora*.

Keywords: garden trees; photosynthetic characteristics; physiological and environmental factors; structural modelling; Zhengzhou City

光合作用是影响植物生长发育的重要生理过程,也是植物进行物质积累和生长的基本途径^[1]。研究表明,植物的光合作用越强,越有利于生物量的累积,从而加速植物生长^[2]。植物的光合特性不仅可以反映植物对环境的适应性,同时可以体现其对环境因子(光照、水分、温度等)的响应^[3]。园林植物是自然资源的主要组成部分,包括乔木、灌木、藤本、草本等植物类型^[4],构成了城市生态系统的多样性。大量研究表明,园林木本植物的光合作用会受到自身生理作用和环境因素的影响^[5-6]。孙安安等^[7]通过对4种荒漠植物光合特性研究发现,净光合速率与蒸腾速率、气孔导度呈现显著的正相关关系。张衷华等^[4]在对凤丹(*Paeonia ostii*)和紫斑牡丹(*P. rockii*)光合特性的研究中发现光照强度、温度和湿度等环境因子对植物的净光合速率有显著影响。有研究表明城市中较高质量浓度的空气颗粒污染物大量附着在植物叶片上,会堵塞气孔,损坏叶片表面结构,进而导致植物的光合作用变缓,影响植物生长^[8]。目前对于滞尘量的研究主要集中在植物滞尘能力的比较^[9],但有关量化滞尘对于植物光合特性的影响以及对其生理特性的影响研究鲜见报道。

温度和湿度是影响光合特性的重要因素^[10],随季节的变化,温度、湿度等环境因素会呈现显著的差异。王月容等^[11]通过对8种园林植物的研究发现,适宜的温度和湿度对植物光合作用有促进作用,有利于植物的生长和物质的积累。杨通文等^[12]通过对不同季节桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)光合特性的影响研究发现,不同季节下生理和环境因子对光合作用的影响均不同。曾伟等^[13]研究发现季节变化影响植物光合作用,研究不同季节植物的光合作用可以探明植物的环境适应性。目前对园林植物光合特性的研究主要集中在干旱胁迫、高温胁迫等环境因子的影响方面^[14-15],而对生理及环境因素共同影响园林植物光合特性的研究尚鲜见报道。

郑州市地处暖温带—北亚热带过渡带,同时适合南北方植物生长,有较为丰富的园林植物资源^[16]。过往对于园林树木的研究主要局限于对比

不同物种的滞尘量以及不同季节的光合速率^[17],并未对其影响因素及它们之间的相互作用进行深入研究。由于郑州市四季分明,城市化程度较高,且伴随着较为严重的空气污染,为探讨滞尘量、不同季节温湿度以及植物的光合特性之间的相互关系提供了较好的研究环境。本研究拟通过研究郑州市4种典型园林树木在不同季节的光合特性及其对环境变化和生理特性的响应,深入探讨在环境污染的情况下园林树木光合速率的驱动机制。研究结果可为郑州市园林树木保护以及城市森林康养提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省郑州市龙子湖公园(112°42'~114°14'E, 34°16'~34°58'N),属大陆性季风气候,冬冷夏热四季分明,年均气温14.4℃,年均降水量达640.9mm^[18]。龙子湖公园水域面积约0.95km²,水体规模约220万m³,绿地面积96.2hm²,是郑东新区城市绿地系统的重要组成部分。

1.2 供试树种

根据郑州市城市绿化树种推荐名录及郑州市常见树种,选择女贞(*Ligustrum lucidum*)、荷花玉兰(*Magnolia grandiflora*)、悬铃木(*Platanus orientalis*)、槐(俗名国槐,*Styphnolobium japonicum*)4种最具有代表性的10年生乔木树种,其生长状况见表1。

表1 4种园林树木生长情况

Table 1 Growth status of four gardens trees

树种 species	树高/m tree height	胸径/cm DBH	叶面积/cm ² leaf area
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	7.20±1.28	16.50±1.16	18.76±3.14
悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	12.40±2.73	33.43±2.40	148.40±8.02
荷花玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	10.43±0.65	19.10±1.49	82.33±10.32
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i>	7.50±2.33	11.63±2.98	38.33±5.03

参照林星宇等^[19]的城市道路绿地乔木滞尘能力对光合作用的研究,同时考虑到所选指标中植物

滞尘量受环境影响较大,因此所选树种均位于污染源相对一致的步道两侧,保证了环境的相对一致性。

1.3 研究方法

参照胡梦玲等^[20]的研究,试验选取植物的净光合速率(P_n)代表4种园林树木的光合特性,单位叶面积滞尘量、湿度和温度作为影响植物光合特性的环境因素,气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度作为影响植物光合特性的生理因素。由于本次试验选择的树种均为园林树种,结合郑州市气候特点及过往研究^[13],采样时间分别为春季(4月2日、4月6日、4月14日)、夏季(7月24日、7月28日、8月4日)、秋季(9月11日、9月15日、9月22日)。测试期间均为天气晴朗无风或微风的状态,但因夏季多雨,所以在第1次和第2次测量期间下过一次雨。

1.3.1 滞尘试验

一般认为降雨量大于15 mm时叶片上的灰尘可以被冲刷掉,这时可以认为叶片上的粉尘量为零,然后重新滞尘。试验在每个季节选取一次降雨后3、7、14 d进行指标测定,保证试验时天气为晴朗无风或微风的典型天气,通过洗脱-分级过滤法进行滞尘量的测定。

室外采样时,所测树种每种选择3棵生长状况相似的树进行重复试验,采集大叶15片、小叶30片,采集过程中避免抖落,采摘后装入自封袋封存,带回实验室放入4℃冰箱中储存。先将叶片放入去离子水中浸泡,用毛刷轻轻刷去叶片上的粉尘,保证叶片形态完整,随后放在滤纸上吸水晾干。将洗涤液先通过孔径106 μm 网筛后,使用玻璃砂芯过滤器将洗涤液依次通过已编号烘干称质量的孔径10.0、2.5、0.1 μm 的尼龙滤膜,过滤后将滤膜放置于40℃烘箱中烘干至质量恒定,其与干净滤膜的质量之差即为叶片滞留不同粒径颗粒物质量,不同粒径颗粒物的质量之和即为滞留量。使用CI-203手持式激光叶面积仪(美国CID)测量计算叶面积,采用滞留量来衡量植物的叶片滞尘能力。

1.3.2 光合试验

在不同季节降雨后3、7、14 d运用Licor-6800便携式光合测定仪测定所需的各项光合指标,主要包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。试验选择在室外自然光照条件下进行光合测定,测定时间选择9:00—11:00和14:00—16:00两个时段,此时段内叶面入射光强和叶面温度相对较稳定。测定时各树种选择3株,每株树上选择4个方向的叶片。选

取叶龄相同、大小相似、生长良好且受光方向一致的叶片,每片叶测试3个有效瞬时值。

1.3.3 温度、湿度的测定

在不同季节降雨后3、7、14 d用美国产Kestrel 3500 Pocket Weather Meter风速气象测定仪对温度、湿度进行测定,记录同一时间范围内各树种周围中间点及对照点距地面1.5 m处的温度、湿度。为使记录数据更为准确,同一样地测量3次,取稳定值的平均值作为最终数据。

1.4 数据处理

本研究所有数据均使用Excel 2019进行初步处理,并使用R4.0.4检验数据残差是否服从正态分布。在检验数据的正态分布后使用SPSS 26.0进行双因素方差分析(ANOVA),检验不同季节不同树种间净光合速率的显著性差异。使用Origin 2023并绘制光合速率和其影响因素的一元回归图,广义线性混合模型使用R4.0.4的“MuMIn”数据包建立,结构方程模型使用“lavan”数据包建立^[21]。

2 结果与分析

2.1 不同季节4种园林树木净光合速率差异

不同季节树木净光合速率差异见表2。从表2可以看出,4种园林树木间及其在不同季节之间的净光合速率均有差异。4种园林树木在夏季的净光合速率均显著高于其他季节($P < 0.05$)。4个树种间的净光合速率在夏秋季均没有显著差异,差异体现在春季,国槐在春季时的净光合速率显著高于女贞和荷花玉兰($P < 0.05$),荷花玉兰在夏季和秋季的净光合速率高于女贞和国槐,但差异不显著。

表2 不同季节园林树木净光合速率

Table 2 Net photosynthetic rate of different garden trees among different seasons

单位: $\mu mol / (m^2 \cdot s)$				
季节 season	女贞 <i>L. lucidum</i>	悬铃木 <i>P. orientalis</i>	荷花玉兰 <i>M. grandiflora</i>	国槐 <i>S. japonicum</i>
春季 spring	2.92±0.87 Bb	3.54±1.04 Bab	2.83±0.95 Bb	4.39±2.07 Ba
夏季 summer	5.39±1.41 Aa	6.17±3.51 Aa	6.92±2.66 Aa	5.65±2.67 Aa
秋季 autumn	3.24±2.02 Ba	3.33±1.54 Ba	4.13±0.91 Ba	2.96±1.11 ABa

注:不同大写字母表示不同季节间的显著性差异($P < 0.05$),不同小写字母表示不同树种之间的显著性差异($P < 0.05$)。Different uppercase letters mean significant differences among different season, different lowercase letters mean significant difference among different trees ($P < 0.05$).

2.2 不同树种净光合速率与影响因素的关系

滞尘量、气孔导度、胞间 CO₂浓度、蒸腾速率与净光合速率之间的双变量关系如图 1 所示,显著性如表 3 所示。

从图 1 和表 3 可以看出 4 种园林树木的气孔导度、蒸腾速率与净光合速率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。4 种园林树木的胞间 CO₂浓度与净光合速率之间无显著性关系,滞尘量与净光合速率呈

显著负相关关系 ($P < 0.05$)。4 种园林树木不同季节的环境及生理指标分析见表 4。悬铃木的气孔导度和蒸腾速率较为稳定,3 个季节的平均水平相较于其他树种稍高;春季国槐胞间 CO₂浓度较低,与夏、秋两季均存在显著性差异 ($P < 0.05$),其余树种的胞间 CO₂较稳定。在滞尘量方面,夏季国槐的滞尘量显著低于春、秋季节,但其 3 个季节平均滞尘量均高于其他 3 个树种。

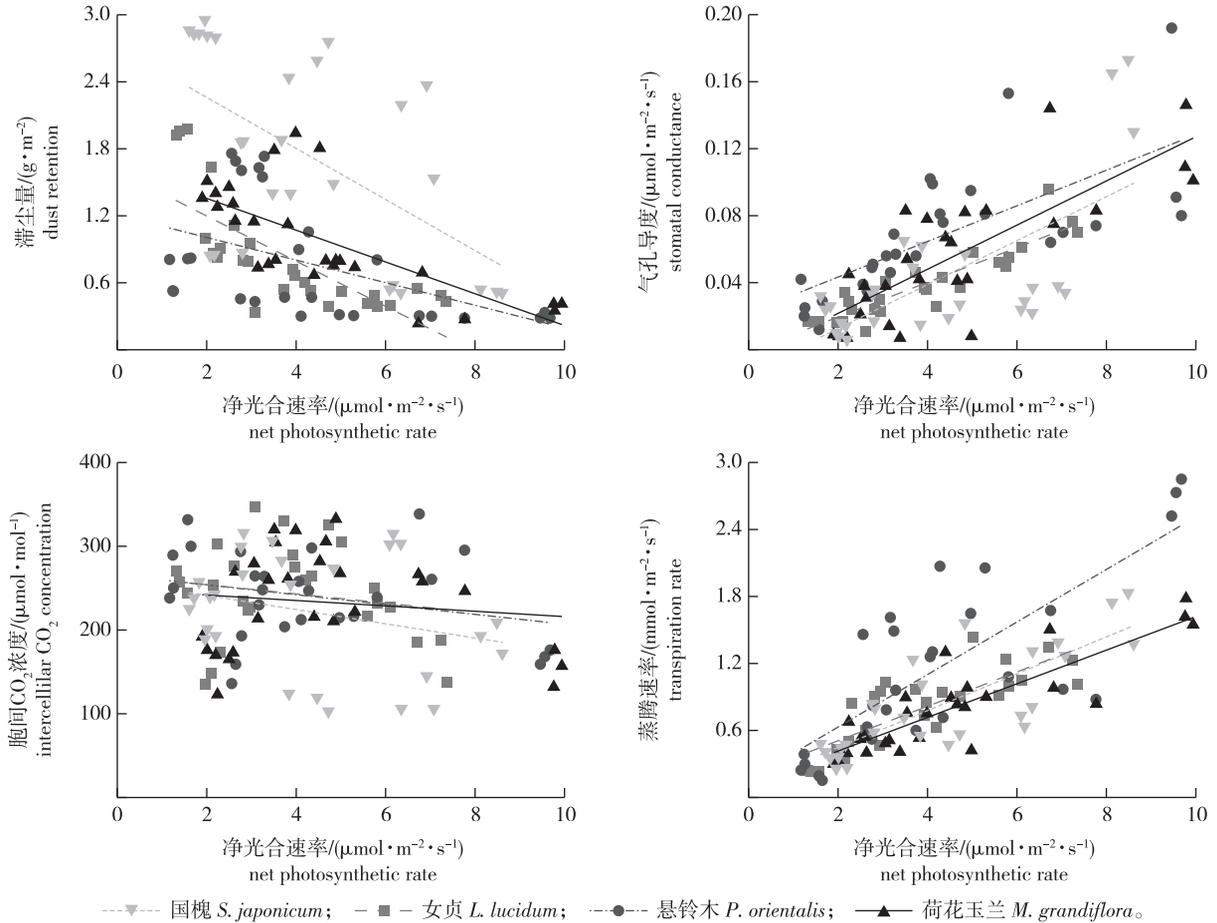


图 1 滞尘量、气孔导度、胞间 CO₂浓度、蒸腾速率与净光合速率之间的双变量关系

Fig. 1 Bivariate relationships between particle size distribution, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate and net photosynthetic rate

表 3 4 种园林树木净光合速率与影响因素的显著性分析

Table 3 Significance analysis net photosynthetic rates and its influencing factors in different garden trees

指标 index	女贞 <i>L. lucidum</i>		悬铃木 <i>P. orientalis</i>		荷花玉兰 <i>M. grandiflora</i>		国槐 <i>S. japonicum</i>	
	R^2	P	R^2	P	R^2	P	R^2	P
滞尘量 dust retention	0.54	< 0.01	0.21	<0.02	0.48	< 0.01	0.30	< 0.01
气孔导度 stomatal conductance	0.80	< 0.01	0.47	< 0.01	0.61	< 0.01	0.44	< 0.01
胞间 CO ₂ 浓度 intercellular CO ₂ concentration	-0.01	0.37	0.04	0.16	-0.02	0.53	0.03	0.17
蒸腾速率 transpiration rate	0.64	< 0.01	0.60	< 0.01	0.73	< 0.01	0.63	< 0.01

表4 4种园林树木不同季节的环境及生理指标
Table 4 Factors affecting net photosynthetic rate in four garden trees

树种 species	季节 season	气孔导度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) transpiration rate	滞尘量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) dust retention	温度/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	湿度/% humidity
女贞 <i>L. lucidum</i>	春	0.03±0.01 B	244.22±80.51 A	0.78±0.24 AB	0.85±0.40 A	19.33±3.91 C	52.89±5.23 B
	夏	0.05±0.02 A	239.63±56.30 A	1.05±0.28 A	0.56±0.09 A	29.50±2.29 A	76.05±8.32 A
	秋	0.03±0.02 B	247.82±27.07 A	0.55±0.34 B	1.06±0.70 A	24.00±1.98 B	41.89±13.23 B
悬铃木 <i>P. orientalis</i>	春	0.07±0.04 A	219.33±45.90 A	1.27±0.44 B	1.41±0.38 A	19.33±3.91 C	52.89±5.23 B
	夏	0.07±0.05 A	247.82±65.08 A	1.43±1.04 A	0.37±0.11 B	29.50±2.29 A	76.05±8.32 A
	秋	0.06±0.03 A	253.23±46.96 A	0.86±0.68 AB	0.53±0.23 B	24.00±1.98 B	41.89±13.23 B
荷花玉兰 <i>M. grandiflora</i>	春	0.04±0.03 A	213.33±73.41 A	0.59±0.23 B	1.54±0.24 A	19.33±3.91 C	52.89±5.23 B
	夏	0.08±0.06 A	219.64±52.24 A	1.07±0.55 A	0.52±0.23 C	29.50±2.29 A	76.05±8.32 A
	秋	0.05±0.02 A	266.73±43.78 A	0.78±0.28 AB	0.89±0.20 B	24.00±1.98 B	41.89±13.23 B
国槐 <i>S. japonicum</i>	春	0.02±0.01 A	142.91±40.70 B	0.72±0.47 A	2.49±0.44 A	19.33±3.91 C	52.89±5.23 B
	夏	0.07±0.07 A	249.21±51.50 A	0.96±0.54 A	0.64±0.16 B	29.50±2.29 A	76.05±8.32 A
	秋	0.04±0.02 A	272.61±31.33 A	0.82±0.40 A	2.05±0.63 A	24.00±1.98 B	41.89±13.23 B

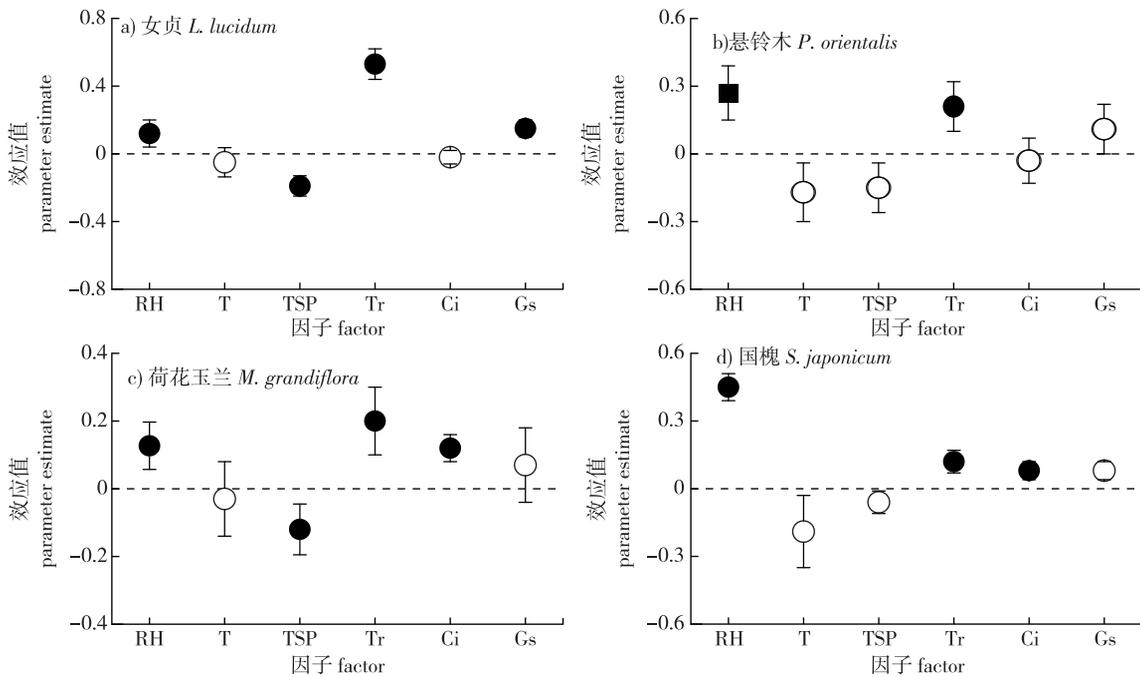
注:同列不同大写字母表示不同季节间的显著性差异 ($P < 0.05$)。Different uppercase letters of same column mean significant differences among different season ($P < 0.05$).

2.3 不同树种的生理、环境因子对净光合速率的影响

不同因素对4种树木净光合速率影响的效应值如图2所示。从图2可以看出,环境因子中湿度与4种树木的净光合速率呈显著正相关 ($P < 0.05$),其中与悬铃木的净光合速率正相关关系达

到极显著水平 ($P < 0.01$);温度则与4种树木的净光合速率呈不显著的负相关关系 ($P > 0.05$);滞尘量与女贞和荷花玉兰的净光合速率呈显著的负相关关系 ($P < 0.05$),与悬铃木和国槐呈不显著的负相关关系 ($P > 0.05$)。

生理因子中蒸腾速率与4种植物的净光合速



■极显著 highly significant ($P < 0.01$); ●显著 significant ($P < 0.05$); ○不显著 not significant ($P > 0.05$)。

RH.湿度 humidity; T.温度 temperature; TSP.滞尘量 dust retention; Tr.蒸腾速率 transpiration; Ci.胞间 CO_2 浓度 intercellular CO_2 concentration; Gs.气孔导度 stomatal conductance。下同 the same below。

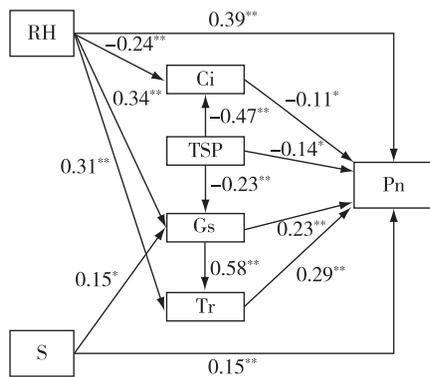
图2 生理、环境因子对净光合速率的影响

Fig. 2 Effects of physiological and ecological factors on net photosynthetic rate

率显著正相关($P < 0.05$);气孔导度和4种植物净光合速率呈正相关,其中与女贞的净光合速率正相关显著($P < 0.05$);胞间 CO_2 浓度与女贞、悬铃木的净光合速率呈不显著的负相关关系($P > 0.05$),与荷花玉兰、国槐的净光合速率呈显著的正相关关系($P < 0.05$)。

2.4 生理、环境因子之间的直接和间接影响

4种园林树木生理和环境因子间结构方程模型的结果见图3。模型的拟合优度为0.40,比较拟合指数(CFI)为0.98,拟合优度指数(GFI)为



S.树种 species; **, $P < 0.01$, *, $P < 0.05$ 。

图3 4种园林树木间生理和环境因子间的结构方程模型

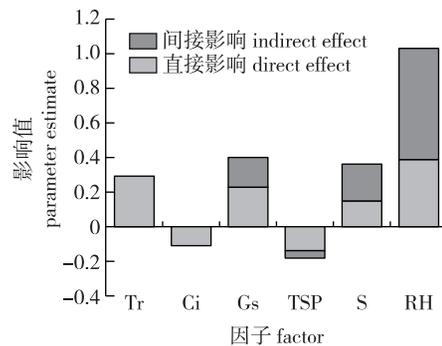
Fig. 3 Structural equation model (SEM) relating of physiological and ecological factors among four garden trees

3 讨论

3.1 不同植物生理因子与净光合速率之间的关系

研究表明4种园林树木气孔导度和蒸腾速率都对净光合速率产生显著的直接影响($P < 0.05$),且气孔导度通过影响蒸腾速率对净光合速率有显著的间接影响($P < 0.05$)。过往研究表明气孔在调节植物水分状况中起关键作用,是植物与外界进行气体交换的通道和控制蒸腾的结构,气孔导度可以反映这种交换能力^[22]。赵辉等^[23]通过对银杏(*Ginkgo biloba*)叶片光合特性的研究发现,气孔导度与蒸腾速率呈正相关关系。Xiong等^[24]研究发现气孔的开闭程度显著影响植物的净光合速率和蒸腾速率,与本研究结果一致。李计达等^[25]在研究植物叶片光合作用的过程中发现,在叶片水分胁迫前期,气孔是引起净光合速率降低的主要因素。蒸腾是植物体内的水分以气体状态向外散失的过程,蒸腾速率可以很好地反映植物水分代谢能力^[26]。植物在受水分胁迫时为了减少水分散失,气孔逐渐关闭,气孔导度降低,从而导致叶片净光合速率降低^[27]。气孔可能会随着环境条件的变化调节其开放程度,从而使植物在不同环境中具

有一定的适应性^[28]。从图3可看出湿度对植物净光合速率有极显著的直接影响($P < 0.01$)和极显著的间接影响($P < 0.01$),路径系数为0.39。其次是气孔导度、树种对植物净光合速率具有极显著直接影响和间接影响($P < 0.01$),路径系数分别为0.23和0.15;蒸腾速率对植物净光合速率呈极显著直接影响,路径系数为0.29。滞尘量、胞间 CO_2 浓度对净光合速率呈现显著的负直接影响($P < 0.05$)。



有一定的适应性^[28]。

从广义线性混合模型可以看出胞间 CO_2 浓度在不同的树种中与光合速率的相关性并不一致。Farquhar等^[29]研究表明,净光合速率降低而胞间 CO_2 浓度也降低,主要是由气孔因素引起的;净光合速率降低而胞间 CO_2 浓度上升,主要是由非气孔因素引起的。宫江平等^[30]的研究结果表明,由于受到气孔限制导致榆树的净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈显著负相关。刘振凡等^[31]研究表明园林植物在受到盐胁迫时不受气孔限制从而导致净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈正相关关系。本研究中,荷花玉兰和国槐的净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈现正相关,说明这两种树木净光合速率的下降可能是由于气孔因素所致,而女贞和悬铃木的净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈现负相关,具体原因还需要进一步研究。

3.2 环境因子与不同植物净光合速率之间的关系

通过广义线性混合模型和结构方程模型研究发现,滞尘量对4种树木产生了显著的直接效应和间接效应($P < 0.05$)。光合作用可能受环境因子和生理因子的共同作用^[32],贺丹等^[33]在对郑州市园林植物的研究中发现空气颗粒物会显著影响木

本植物的净光合速率。研究认为,滞尘会堵塞植物叶片表面气孔,使其气孔导度显著下降,进而影响净光合速率^[34]。李诗瑶等^[35]对叶面滞尘量和树种的光合参数损失率进行了多元线性回归分析,表明叶片滞尘遮蔽了光的有效辐射,进而造成净光合速率的降低。因此,本研究的滞尘量与净光合速率显著的负相关关系可能是由于滞尘导致了气孔的堵塞,从而遮蔽了有效辐射导致净光合速率显著下降。

本研究的广义线性混合模型中,温度对4种树木净光合速率的影响均不显著,而广义线性模型和结构方程模型结果均显示湿度是影响4个树种光合作用的最主要因素($P < 0.01$)。湿度对净光合速率产生了最显著的直接效应和间接效应,这可能是由于4个树种的光合作用主要受水分的影响。这与胡新生等^[36]认为湿度是影响杨树净光合速率的最主要因素的结果一致。过往研究表明在条件适宜的情况下,充足的水分供应可长期提高叶片的光合特性^[22],而水分亏缺的时候植物叶片会通过关闭气孔的方式降低气孔导度和植物的蒸腾速率^[14]。水分胁迫会导致植物的生理、生化以及表面形态结构发生变化,减弱其光合作用,导致生长变缓^[37]。而充足的环境湿度可以显著地增大植物细胞体积,增加叶面积,增强光合作用^[38],这可能是导致湿度是本研究中影响净光合速率的关键因子的原因。

通过对4种园林树木光合生理与环境因子的相关性研究,发现不同季节4种园林树木净光合速率均存在显著性差异,其中中国槐的光合特性显著高于其他树种,可以作为优选树种。各树种在夏季的净光合速率显著高于其他季节。女贞、荷花玉兰的净光合速率与生理、环境因子之间的相关性较强。湿度是影响植物净光合速率的最重要的直接影响因子,与净光合速率呈现极显著正相关关系。

参考文献(reference):

- [1] YANG B, TANG J, YU Z, et al. Light stress responses and prospects for engineering light stress tolerance in crop plants[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38: 1489-1506. DOI: 10.1007/s00344-019-09951-8.
- [2] 魏静, 谭星, 闫瑞, 等. 引种鸡爪槭光合特性及叶片呈色对异质生境的响应[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 125-138. WEI J, TAN X, YAN R, et al. Responses of leaf color and photosynthetic characteristics to heterogeneous habitats in introduced *Acer palmatum*[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2024, 46(2): 125-138. DOI: 10.13718/j.cnki.xdsk.2024.02.013.
- [3] 宁朋, 王菲, 程小毛, 等. 川滇高山栎光合特性对不同海拔梯度的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(6): 47-53. NING P, WANG F, CHENG X M, et al. Responses of photosynthetic characteristics to different altitudes of *Quercus aquifolioides*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(6): 47-53. DOI: 10.11929/j.swfu.2020.06.067.
- [4] 张衷华, 唐中华, 杨逢建, 等. 两种主要油用牡丹光合特性及其微环境影响因子分析[J]. 植物研究, 2014, 34(6): 770-775. ZHANG Z H, TANG Z H, YANG F J, et al. Photosynthetic characteristics and its micro-environmental limiting factors of two main oil peony[J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(6): 770-775. DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2014.06.009.
- [5] 汤文华, 窦全琴, 潘平平, 等. 不同薄壳山核桃品种光合特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 81-88. TANG W H, DOU Q Q, PAN P P, et al. Photosynthetic characteristics of grafted plants of different *Carya illinoensis* varieties[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(3): 81-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2019.03.004.
- [6] XU Z, JIANG Y, ZHOU G. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 701. DOI: 10.3389/fpls.2015.00701.
- [7] 孙安安, 智颖帆, 姜平平, 等. 西鄂尔多斯4种荒漠植物光合作用特征与差异性[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4944-4952. SUN A A, ZHI Y B, JIANG P P, et al. Characteristics of and differences in photosynthesis in four desert plants in western ordos[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4944-4952. DOI: 10.5846/stxb2018.02.120363.
- [8] 杨建欣, 黄秋燕. 园林植物化感作用机理研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 90-97. YANG J X, HUANG Q Y. Research progress and prospect of allelopathy mechanism in garden plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(13): 90-97. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.015.
- [9] POPEK R, PRZYBYSZ A, GAWRONSKA H, et al. Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 163: 56-62. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.07.051.
- [10] 吴统贵, 曾广泉, 肖杨根, 等. 湿地松林下6种树种光合日变化及其与环境因子的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 135-138. WU T G, ZENG G Q, XIAO Y G, et al. Daily variation of photosynthesis of six tree species under *Pinus elliotii* forest and their relations with environmental factors[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2011, 35(5): 135-138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2011.05.030.
- [11] 王月容, 谢军飞, 李薇, 等. 基于环境舒适度的8种园林植物光合特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 124-130. WANG Y R, XIE J F, LI W, et al. Study on photosynthetic characteristics of 8 garden plants based on environmental comfort[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 124-130. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.35.022.
- [12] 杨通文, 高秀梅, 韩维栋. 不同季节桃金娘光合特性与光系统PS II活性研究[J]. 西南农业学报, 2022, 35(12): 2801-2810. YANG T W, GAO X M, HAN W D. Photosynthetic characteristics and PS II activity of *Rhodomyrtus tomentosa* in different seasons[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(12): 2801-2810. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.12.014.
- [13] 曾伟, 熊彩云, 肖复明, 等. 中亚热带常绿阔叶林优势树种幼树光合特性季节动态[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 157-160. ZENG W, XIONG C Y, XIAO F M, et al. Seasonal dynamic study on photosynthetic characteristics of dominant evergreen broadleaved forest[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2014, 38(5): 157-160. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.05.031.
- [14] 曹小林, 郝清玉, 王勇, 等. 干旱胁迫下6种海防林植物幼苗光合生理特性及抗旱性评价[J]. 分子植物育种, 2023, 21(10): 3424-3432. CAO X L, HAO Q Y, WANG Y, et al. Photosynthetic and physiological characteristics and drought resistance evaluation of six coastal plants under drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(10): 3424-3432. DOI: 10.13271/j.mpb.021.003424.
- [15] 张星, 王苗苗, 李国雷, 等. 栓皮栎和锐齿槲栎幼苗光合特性

- 对高温胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(7): 25-35. ZHANG X, WANG M M, LI G L, et al. Photosynthetic response of *Quercus variabilis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* seedlings to high temperature stress [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(7): 25-35. DOI: 10.12171/j.1000-1522.2021.02.40.
- [16] 于晨一, 李镇江, 孙怡洁, 等. 太行山南麓锐齿槲栎-油松混交林竞争关系与空间格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(3): 107-115. YU C Y, LI Z J, SUN Y J, et al. Spatial pattern and tree competition in the *Quercus aliena* var. *acuteserrata*-*Pinus tabulaeformis* mixed forest in the south of Taihang mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(3): 107-115. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.03.012.
- [17] 路艳, 卞贵建, 季洪亮. 道路绿化树种滞尘的季节效应与叶片特征关系[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(3): 269-275. LU Y, BIAN G J, JI H L. Relationship between seasonal effects of dust retention and leaf characteristics of tree species for road greening[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(3): 269-275. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2020.03.006.
- [18] 郭晖, 周慧, 张家洋. 郑州市15种常见园林树种固碳释氧能力分析研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 52-56. GUO H, ZHOU H, ZHANG J Y. Carbon fixation and oxygen release of 15 common landscape trees in Zhengzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.04.09.
- [19] 林星宇, 李海梅, 李彦华, 等. 八种乔木滞尘效益及其与叶表面特征关系[J]. 北方园艺, 2019(17): 94-101. LIN X Y, LI H M, LI Y H, et al. Relationship between the surface characteristics of eight tree leaves and dust retention[J]. Northern Horticulture, 2019(17): 94-101. DOI: 10.11937/bfy.2018.38.53.
- [20] 胡梦玲, 阿丽亚·拜都热拉, 刘丽, 等. 果树叶片滞尘对其光合速率和耗水特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(11): 2032-2042. HU M L, ALIYA B, LIU L, et al. Effect of dust retaining on photosynthetic rate and water consumption characteristics of fruit leaves[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(11): 2032-2042. DOI: 10.6408/j.issn.1001-4330.2019.11.009.
- [21] NADEAU M B, SULLIVAN T P. Relationships between plant biodiversity and soil fertility in a mature tropical forest[J]. International Journal of Forestry Research, 2015, e732946. DOI: 10.1155/2015/732946.
- [22] 高冠龙, 冯起, 刘贤德, 等. 三种经验模型模拟荒漠河岸怪柳叶片气孔导度[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3486-3494. GAO G L, FENG Q, LIU X D, et al. Simulating the leaf stomatal conductance of the desert riparian *Tamarix ramosissima* Ledeb. based on three empirical models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3486-3494. DOI: 10.5846/stxb201902220324.
- [23] 赵辉, 吕良贺, 路鑫, 等. 杂种金叶银杏叶片光合特性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 193-199. ZHAO H, LV L H, LU X, et al. Analysis of photosynthetic characteristics of hybrid golden leaf ginkgo [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(1): 193-199. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201809012.
- [24] XIONG D, FLEXAS J. From one side to two sides; the effects of stomatal distribution on photosynthesis[J]. The New phytologist, 2020, 228(6): 1754-1766. DOI: 10.1111/nph.16801.
- [25] 李计达, 张蔓蔓, 刘春鹏, 等. 败育雌性毛白杨优良无性系的生长性状特征和光合特性[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(10): 1-7. LI J D, ZHANG M M, LIU C P, et al. Characterization of growth traits and photosynthetic properties of good asexual lines of abortive male *Populus tomentosa* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(10): 1-7. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2023.10.013.
- [26] 袁颖红, 樊后保, 吴建平, 等. 不同年龄人工林尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*) 叶片光合特性及水分利用效率[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(1): 58-63. YUAN Y H, FAN H B, WU J P, et al. The photosynthesis characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations of different ages [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2016, 22(1): 58-63. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.06.020.
- [27] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4333-4343. LUO D D, WANG C K, JIN Y. Stomatal regulation of plants in response to drought stress [J]. The Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4333-4343. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2019.12.004.
- [28] 叶思源, 尚鹤, 陈展, 等. 不同浓度CO₂对马尾松幼苗光合特性及单萜烯释放的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 71-78. YE S Y, SHANG H, CHEN Z, et al. Effects of elevated CO₂ on photosynthetic characteristics and monoterpene emissions in *Pinus massoniana* seedlings [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(6): 71-78. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2019.03.034.
- [29] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345. DOI: 10.1146/annurev.pp.33.060182.001533.
- [30] 宫江平, 高波, 努尔塔依·铁利汗, 等. 榆树秋季衰老叶光合特性研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 22-28. GONG J P, GAO B, NUERTAYI T, et al. Photosynthetic characteristics of *Ulmus Pumila* senescing leaves in autumn [J]. Journal of Xinjiang Normal University Natural (Sciences Edition), 2015, 34(3): 22-28. DOI: 10.14100/j.cnki.1008-9659.2015.03.004.
- [31] 刘振凡, 崔广强, 吴成华, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下园林植物再力花生生长发育和光合特性的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(12): 79-88. LIU Z F, CUI G Q, WU C H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and photosynthetic characteristics of ornamental plant *Thalia dealbata* under salt stress [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(12): 79-88. DOI: 10.14083/j.issn.1001-4942.2023.12.011.
- [32] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 地表覆盖及生理生态因子对苹果树光合特性的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 125-130. ZHANG Y, XIE Y S, HAO M D, et al. Effects of different surface mulch models and physiological ecology factors on apple photosynthesis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 125-130. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.01.035.
- [33] 贺丹, 李海涛, 原江琴, 等. 郑州市7种园林植物滞尘能力与叶片生理及光合响应[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(6): 1205-1214. HE D, LI H T, YUAN J Q, et al. Dust retention capacity and leaf physiology and photosynthesis response of 7 garden plants in Zhengzhou City [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(6): 1205-1214. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2023.01.60.
- [34] 王书恒, 朱晓宇, 田如男, 等. 南京市6种常见园林植物滞尘效益的综合分析[J]. 中国园林, 2021, 37(6): 111-116. WANG S H, ZHU X Y, TIAN R N, et al. Comprehensive analysis of dust retention efficiency of six common garden plants in Nanjing [J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(6): 111-116. DOI: 10.19775/j.cla.2021.06.0111.
- [35] 李诗瑶, 王融融, 樊瑾, 等. 叶面滞尘对火电厂周边绿化树种叶片反射光谱及光合作用的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 1-9, 40. LI S Y, WANG R R, FAN J, et al. Influence of leaf dust retention on leaf surface reflectance spectroscopy and photosynthesis of greening tree species around thermal power plant [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 1-9, 40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.01.01.
- [36] 胡新生, 刘建伟, 王世绩. 四个杨树无性系在不同温度和相对湿度条件下净光合速率的比较研究[J]. 林业科学, 1997(2): 12-21. HU X S, LIU J W, WANG S J. Comparison of the net photosynthesis rate of four poplar clones at different temperature and humidity regimes [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997(2): 12-21.
- [37] 刘建锋, 叶建仁. 水分胁迫与植物侵染性病害的发生[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004(2): 67-71. LIU J F, YE J R. Involvement of water stress in prevailing of plant infectious diseases [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2004(2): 67-71.
- [38] HOFFMAN G J, RAWLINS S L, GARBER M J, et al. Water relations and growth of cotton as influenced by salinity and relative humidity [J]. Agronomy Journal, 1971, 63(6): 822-826. DOI: 10.2134/AGRONJ1971.00021962006300060002X.