

环境因子对辣椒光合与蒸腾特性的影响

邹学校, 马艳青, 张竹青, 陈文超, 刘荣云, 戴雄泽

(湖南省农业科学院国家辣椒新品种技术研究推广中心, 湖南长沙 410125)

摘要: 采用灰色关联分析方法研究环境因子对辣椒 (*Capsicum annuum* Linn.) 光合和蒸腾特性的影响。结果表明, 在强光照下影响净光合速率的环境因子大小顺序为相对湿度、CO₂ 浓度、温度、光照强度、气孔导度; 净光合速率与相对湿度、叶温呈显著的负相关, 与 CO₂ 浓度呈极显著的正相关; 蒸腾速率与气温呈极显著的正相关, 与相对湿度呈极显著的负相关; 水分利用效率与相对湿度呈极显著的正相关, 与温度呈极显著的负相关。弱光照时影响净光合速率的环境因子大小顺序为光照强度、温度、相对湿度、CO₂ 浓度; 净光合速率与光照强度、CO₂ 浓度呈显著的正相关, 与相对湿度呈显著的负相关。在强光照下适当遮阳、灌水、增施 CO₂ 肥, 在弱光照下减少荫蔽、通风透气、降低相对湿度、增加温度可促进辣椒光合作用, 提高辣椒产量。

关键词: 辣椒; 净光合速率; 蒸腾速率; 环境因子; 灰色关联分析

中图分类号: Q945.11; S641.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-0978(2005)04-0015-06

Effects of environment factors on photosynthesis and transpiration characters of *Capsicum Annuum* ZOU Xue-xiao, MA Yan-qing, ZHANG Zhu-qing, CHEN Wen-chao, LIU Rong-yun, DAI Xiong-ze (National Research and Extension Center of New Pepper Variety Technology, Hu'nan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2005, 14(4): 15-20

Abstract: The effects of environment factors on photosynthesis and transpiration characters of *Capsicum annuum* Linn. were studied by using the grey relational analysis. The results indicated that under strong light the order of effects of environment factors on the net photosynthesis rate was relative humidity, CO₂ concentration, temperature, light intensity, stomatal conductance successively. The net photosynthesis rate has the significant negative correlation with relative humidity or leaf temperature and the significant positive correlation with CO₂ concentration. The transpiration rate has the significant positive correlation with air temperature but the significant negative correlation with relative humidity. The water utilization efficiency has the significant positive correlation with relative humidity but the significant negative correlation with temperature. Under weak light the order of effects of the environment factors on the net photosynthesis rate was light intensity, temperature, relative humidity, CO₂ concentration successively. The net photosynthesis rate has the significant positive correlation with light intensity and CO₂ concentration and the significant negative correlation with relative humidity. The results show that it's very useful to increase net photosynthesis rate and yield of *C. annuum* under strong light with proper shading, irrigating and increasing CO₂ concentration or under weak light with ventilating, heating, reducing shading and relative humidity.

Key words: *Capsicum annuum* Linn.; net photosynthesis rate; transpiration rate; environment factor; grey relational analysis

光合作用和蒸腾作用是植物最重要的生理活动, 它们与环境因子中的光照、温度和湿度的关系密切, 同时光合作用还是植物产量构成的主要因素, 研究光合作用、蒸腾作用特性与环境因素的关系, 有助于采取适当的栽培措施增强植物的光合能力, 从而达到提高产量的目的^[1]。国内外对水稻 (*Oryza sativa* Linn.)^[2,3]、普通小麦 (*Triticum aestivum*

Linn.)^[4,5]、陆地棉 (*Gossypium hirsutum* Linn.)^[6]、大豆 [*Glycine max* (Linn.) Merr.]^[7]、美味猕猴桃 (*Actinidia deliciosa* C. F. Liang)^[8]、黄瓜 (*Cucumis*

收稿日期: 2005-03-07

基金项目: 国家'863'计划项目(2002AA2070012)

作者简介: 邹学校(1963-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 研究员, 主要从事辣椒品种资源和育种研究。

sativus Linn.)^[9]、茄子 (*Solanum melongena* Linn.)^[10]、莴苣 (*Lactuca sativa* Linn.)^[11,12] 等作物进行了大量的相关研究,对提高这些作物产量起了一定的作用。霍振荣等^[13]研究了辣椒 (*Capsicum annuum* Linn.) 不同品种、不同叶位净光合速率差异及其日变化规律以及光量子通量密度对净光合速率、蒸腾速率及相关环境因子,对辣椒的光合作用和蒸腾作用特性与环境因子间的关系进行灰色关联分析、相关分析和通径分析,以期对辣椒高产栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

辣椒 (*Capsicum annuum* Linn.) 雄性不育杂交品种‘湘辣4号’(‘Xiangla No. 4’),2003年12月27日播种于湖南省农业科学院蔬菜研究所试验示范农场。2004年3月10日排苗,4月15日定植于大田。田间管理同当地常规栽培。测定叶片选用刚成熟的正常功能叶。

1.2 方法

用美国CID公司开路型C1310便携式光合测定系统测定辣椒的净光合速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);测量的环境因子有光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、进气口的相对湿度(RHin, %)、通过叶室后出来气体的相对湿度(RHout, %),进气口的CO₂浓度值(CO₂in, 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、通过叶室后出来气体的CO₂浓度值(CO₂out, 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、气孔导度(Sc, $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间CO₂浓度(Int. CO₂, 1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、叶室内的环境温度即气温(Ta, °C)和由红外温度传感器测量的叶温(Tl, °C)。5月21日晴天的上午10时30分至11时30分测定40株,6月28日阴天的下午16时至17时测定45株,每株测定1片叶。水分利用效率为净光合速率占蒸腾速率的百分比。

灰色关联分析参照唐启义等^[14]方法,用DPS数据处理系统进行灰色关联分析、相关分析和通径分析。

2 结果和分析

2.1 强光照下辣椒光合和蒸腾特性与环境因子的关系

5月21日上午测定的光合有效辐射为1 300 ~ 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,所测叶片的蒸腾速率都大于零,蒸腾作用强。

2.1.1 辣椒光合和蒸腾特性与环境因子的灰色关联分析 以5月21日测定的结果计算在强光照作用下辣椒净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率与环境因子间的灰色关联系数和关联序列入表1。当分辨系数为0.5时,辣椒净光合速率与环境因子间关联度的大小顺序为RHout、RHin、CO₂in、胞间CO₂浓度、CO₂out、气温、叶温、光合有效辐射和气孔导度。比较当分辨系数分别为0.1、0.3、0.5时的净光合速率与环境因子间关联度和关联序的差异,可以看出,一般分辨系数大时,关联度也大,但对关联序没有影响。

当分辨系数为0.5时,蒸腾速率与环境因子间的关联度的大小顺序为气孔导度、气温、CO₂out、胞间CO₂浓度、CO₂in、叶温、光合有效辐射、RHout和RHin。当分辨系数为0.1、0.3、0.5时,比较蒸腾速率与环境因子间关联序的差异(见表1)发现,分辨系数的改变对气孔导度、光合有效辐射、RHin和RHout的顺序没有影响,对CO₂in、CO₂out、胞间CO₂浓度和气温的顺序影响较小,对叶温的顺序影响较大。

当分辨系数为0.5时,辣椒的水分利用效率与环境因子的灰色关联度的大小顺序为RHin、RHout、CO₂in、胞间CO₂浓度、叶温、CO₂out、气温、光合有效辐射和气孔导度。比较分辨系数为0.1、0.3、0.5时水分利用效率与环境因子间关联序的差异(见表1)发现,分辨系数的改变对光合有效辐射、RHin、RHout、CO₂in、气孔导度和胞间CO₂浓度的顺序没有影响,对CO₂out和气温的影响较小,对叶温的影响较大。

2.1.2 辣椒光合、蒸腾特性与环境因子的相关分析 在强光照下辣椒净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率与环境因子的相关系数列入表2。由表2可知,净光合速率与CO₂out和叶温间的简单相关较强,相关系数达到了显著水平,其他环境因子的简单

相关相对较弱。偏相关的分析结果表明,净光合速度与 RHin、RHout、CO₂in、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度间偏相关系数达显著或极显著水平,其他环境因子的偏相关不显著。

蒸腾速率与 RHin、RHout、CO₂in、CO₂out、气孔导度和气温间的简单相关系数达到极显著水平,其他环境因子的简单相关不显著。偏相关只有气孔导度达到了极显著水平,其他环境因子都不显著。

辣椒叶片水分利用效率与 RHin、RHout、CO₂in、CO₂out、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和气温间的简单相关系数达到极显著水平;偏相关与 CO₂in、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度 3 个环境因子达到显著或极显著水平,其他环境因子的相关不显著。

2.1.3 辣椒光合和蒸腾特性与环境因子的通径分析 在强光照作用下辣椒净光合速率与环境因子间的通径分析结果列入表 3。从表 3 可知, RHout、

表 1 强光照下辣椒光合及蒸腾特性与环境因子的灰色关联分析¹⁾

Table 1 Grey relational analysis of photosynthesis and transpiration characters of *Capsicum annuum* Linn. with environment factors under strong light¹⁾

参数 Parameter	净光合速度 Net photosynthesis rate				蒸腾速率 Transpiration rate				水分利用效率 Water utilization efficiency			
	关联系数 Association coefficient		关联序 Correlation order		关联系数 Association coefficient		关联序 Correlation order		关联系数 Association coefficient		关联序 Correlation order	
	0.5	0.1	0.3	0.5	0.5	0.1	0.3	0.5	0.5	0.1	0.3	0.5
PAR	0.770 4	8	8	8	0.642 2	7	7	7	0.664 1	8	8	8
RHin	0.788 1	2	2	2	0.621 2	9	9	9	0.704 5	1	1	1
RHout	0.788 9	1	1	1	0.624 3	8	8	8	0.703 5	2	2	2
CO ₂ in	0.786 2	3	3	3	0.658 1	6	6	6	0.690 8	3	3	3
CO ₂ out	0.784 4	5	5	5	0.658 7	4	4	3	0.689 3	5	5	6
Sc	0.729 1	9	9	9	0.864 8	1	1	1	0.622 4	9	9	9
Int. CO ₂	0.785 5	4	4	4	0.658 3	5	5	4	0.690 2	4	4	4
Ta	0.783 1	6	6	6	0.659 2	3	2	2	0.689 2	6	7	7
TI	0.779 0	7	7	7	0.658 1	2	3	6	0.689 7	7	6	5

¹⁾ PAR: 光合有效辐射 Photosynthesis available radiation; RHin: 进气口的相对湿度 Relative humidity in leaf; RHout: 通过叶室后出来气体的相对湿度 Relative humidity out leaf; CO₂in: 进气口的 CO₂ 浓度 CO₂ concentration in leaf; CO₂out: 通过叶室后出来气体的 CO₂ 浓度 CO₂ concentration out leaf; Sc: 气孔导度 Stomatal conductance; Int. CO₂: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Ta: 叶室内的环境温度即气温 Air temperature; TI: 叶温 Leaf temperature.

表 2 强光照下辣椒光合及蒸腾特性与环境因子的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of photosynthesis and transpiration characters of *Capsicum annuum* Linn. with environment factors under strong light¹⁾

参数 Parameter	净光合速度 Net photosynthesis rate		蒸腾速率 Transpiration rate		水分利用效率 Water utilization efficiency	
	简单相关系数 Simple correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient	简单相关系数 Simple correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient	简单相关系数 Simple correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient
	PAR	-0.131 6	-0.133 3	0.125 1	0.184 0	0.009 0
RHin	0.059 9	-0.377 7 *	-0.625 1 * *	-0.167 2	0.509 1 * *	0.147 9
RHout	0.084 7	0.394 0 *	-0.571 1 * *	0.111 6	0.469 2 * *	-0.153 6
CO ₂ in	-0.001 4	0.891 7 * *	0.486 2 * *	0.088 0	-0.426 0 * *	0.573 5 * *
CO ₂ out	-0.315 0 *	-0.073 2	0.470 5 * *	0.167 0	-0.610 5 * *	0.061 2
Sc	0.239 7	0.527 7 * *	0.963 7 * *	0.957 3 * *	0.526 0 * *	-0.364 4 *
Int. CO ₂	-0.145 9	-0.746 7 * *	0.496 4 * *	-0.139 0	-0.532 6 * *	-0.422 9 * *
Ta	-0.198 4	0.107 6	0.423 0 * *	0.072 5	-0.384 7 * *	-0.070 0
TI	-0.345 5 *	-0.006 1	0.076 4	0.176 9	-0.156 8	-0.003 6

¹⁾ PAR: 光合有效辐射 Photosynthesis available radiation; RHin: 进气口的相对湿度 Relative humidity in leaf; RHout: 通过叶室后出来气体的相对湿度 Relative humidity out leaf; CO₂in: 进气口的 CO₂ 浓度 CO₂ concentration in leaf; CO₂out: 通过叶室后出来气体的 CO₂ 浓度 CO₂ concentration out leaf; Sc: 气孔导度 Stomatal conductance; Int. CO₂: 胞间 CO₂ 浓度 Intercellular CO₂ concentration; Ta: 叶室内的环境温度即气温 Air temperature; TI: 叶温 Leaf temperature. *: P < 0.05; * *: P < 0.01.

CO₂in、气孔导度和气温对净光合速率的直接作用为正效应,其他环境因子的直接作用为负效应。光合有效辐射的直接作用和间接作用都较小;RHin、RHout、CO₂out、气孔导度、气温和叶温的直接作用小于间接作用,且间接作用是以CO₂in和胞间CO₂浓度为主;CO₂in和胞间CO₂浓度的直接作用和间接作用都较大,CO₂in的间接作用以胞间CO₂浓度为主,胞间CO₂浓度的间接作用则以CO₂in为主。

环境因子对辣椒蒸腾速率间的通径分析表明,RHin和胞间CO₂浓度的直接作用为负效应,其他环境因子为正效应。光合有效辐射的直接和间接作用都较小;RHin、胞间CO₂浓度的直接效应和间接效应都较大,RHin的间接作用是以胞间CO₂浓度和气孔

导度的作用为主,胞间CO₂浓度的间接作用是以RHin的作用为主;RHout、CO₂in、CO₂out、气温和叶温是间接效应大于直接效应,间接效应是以RHin和胞间CO₂浓度的作用为主;气孔导度是以直接作用为主,间接作用较小。

辣椒水分利用效率与环境因子间的通径分析结果表明,光合有效辐射、RHin、CO₂in和CO₂out的直接作用为正效应,其他环境因子为负效应。光合有效辐射、气孔导度和叶温的直接作用和间接作用都较小,RHin、RHout、CO₂out和气温的间接效应大于直接效应,间接效应是以CO₂in和胞间CO₂浓度的作用为主;CO₂in和胞间CO₂浓度的直接作用和间接作用都较大,CO₂in的间接效应是以胞间CO₂浓度的作

表3 强光照下辣椒光合及蒸腾特性与环境因子的通径分析¹⁾

Table 3 Path analysis of photosynthesis and transpiration characters of *Capsicum annuum* Linn. with environment factors under strong light¹⁾

性状 Character	参数 Parameter	直接作用 Direct effect		间接作用 Indirect effect							
		PAR	RHin	RHout	CO ₂ in	CO ₂ out	Sc	Int. CO ₂	Ta	Tl	
Np	PAR	-0.037 1		0.006 1	-0.062 7	-0.655 1	0.011 9	0.010 3	0.569 8	0.027 0	-0.001 7
	RHin	-1.663 3	0.000 1		1.850 9	-5.138 0	0.145 5	-0.110 4	5.081 2	-0.108 5	0.002 4
	RHout	1.861 5	0.001 3	-1.653 8		-5.141 2	0.146 2	-0.094 9	5.075 2	-0.112 1	0.002 7
	CO ₂ in	5.688 5	0.004 3	1.502 4	-1.682 4		-0.157 2	0.085 3	-5.533 0	0.092 8	-0.001 9
	CO ₂ out	-0.167 4	0.002 6	1.446 1	-1.625 7	5.343 5		0.078 3	-5.483 7	0.093 4	-0.002 1
	Sc	0.233 7	-0.001 6	0.785 9	-0.755 8	2.075 3	-0.056 0		-2.069 0	0.026 7	0.000 6
	Int. CO ₂	-5.603 5	0.003 8	1.508 3	-1.686 0	5.616 9	-0.163 8	0.086 3		0.094 1	-0.002 0
	Ta	0.120 6	-0.008 3	1.497 2	-1.730 7	4.375 9	-0.129 6	0.051 8	-4.371 8		-0.003 5
	Tl	-0.004 1	-0.015 0	0.971 1	-1.208 2	2.620 1	-0.086 8	-0.032 4	-2.691 7	0.101 6	
Tr	PAR	0.037 1		0.001 8	-0.011 8	-0.021 1	-0.019 7	0.039 3	0.051 2	0.013 0	0.035 3
	RHin	-0.496 8	-0.000 1		0.348 4	-0.165 5	-0.241 3	-0.422 8	0.456 4	-0.052 4	-0.051 0
	RHout	0.350 4	-0.001 3	-0.493 9		-0.165 6	-0.242 4	-0.363 3	0.455 8	-0.054 1	-0.056 7
	CO ₂ in	0.183 3	-0.004 3	0.448 7	-0.316 7		0.260 8	0.326 5	-0.496 9	0.044 8	0.040 2
	CO ₂ out	0.277 6	-0.002 6	0.431 9	-0.306 0	0.172 2		0.299 7	-0.492 5	0.045 1	0.045 3
	Sc	0.894 9	0.001 6	0.234 7	-0.142 3	0.066 9	0.093 0		-0.185 9	0.012 9	-0.012 1
	Int. CO ₂	-0.503 3	-0.003 8	0.450 5	-0.317 4	0.181 0	0.271 7	0.330 4		0.045 4	0.041 9
	Ta	0.058 2	0.008 3	0.447 1	-0.325 8	0.141 0	0.215 0	0.198 3	-0.392 6		0.073 5
	Tl	0.087 3	0.015 0	0.290 0	-0.227 4	0.084 4	0.144 0	-0.124 2	-0.241 8	0.049 0	
Wu	PAR	0.030 1		-0.004 6	0.047 2	-0.482 5	-0.020 6	-0.013 4	0.491 1	-0.036 2	-0.002 0
	RHin	1.264 1	-0.000 1		-1.391 0	-3.784 3	-0.251 9	0.144 2	4.379 2	0.145 9	0.002 9
	RHout	-1.399 0	-0.001 0	1.256 9		-3.786 6	-0.253 0	0.123 9	4.374 0	0.150 7	0.003 2
	CO ₂ in	4.189 7	-0.003 5	-1.141 7	1.264 4		0.272 2	-0.111 4	-4.768 6	-0.124 7	-0.002 3
	CO ₂ out	0.289 7	-0.002 1	-1.099 0	1.221 8	3.935 7		-0.102 2	-4.726 1	-0.125 5	-0.002 6
	Sc	-0.305 3	0.001 3	-0.597 2	0.568 0	1.528 5	0.097 0		-1.783 2	-0.035 9	0.000 7
	Int. CO ₂	-4.829 4	-0.003 1	-1.146 2	1.267 1	4.137 0	0.283 5	-0.112 7		-0.126 5	-0.002 4
	Ta	-0.162 1	0.006 7	-1.137 8	1.300 7	3.223 0	0.224 4	-0.067 6	-3.767 8		-0.004 2
	Tl	-0.005 0	0.012 2	-0.738 0	0.908 0	1.929 8	0.150 3	0.042 4	-2.319 9	-0.136 5	

¹⁾ Np: 净光合速率 Net photosynthesis rate; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; Wu: 水分利用效率 Water utilization efficient; PAR: 光合有效辐射 Photosynthesis available radiation; RHin: 进气口的相对湿度 Relative humidity in leaf; RHout: 通过叶室后出来气体的相对湿度 Relative humidity out leaf; CO₂in: 进气口的CO₂浓度 CO₂ concentration in leaf; CO₂out: 通过叶室后出来气体的CO₂浓度 CO₂ concentration out leaf; Sc: 气孔导度 Stomatal conductance; Int. CO₂: 胞间CO₂浓度 Intercellular CO₂ concentration; Ta: 叶室内的环境温度即气温 Air temperature; Tl: 叶温 Leaf temperature.

用为主,胞间 CO₂浓度的间接效应是以 CO₂in 的作用为主。

2.2 弱光照下辣椒净光合速率与环境因子的关系

6月28日下午测定的光合有效辐射为 200 ~ 400 μmol · m⁻² · s⁻¹,所测叶片的蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂浓度都很小,蒸腾作用很弱。根据6月28日测定结果,计算在弱光照时辣椒净合速度与环境因子间的灰色关联系数和关联序列入表4。由于蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂浓度都很小,大多数为零,因此未分析它们间的相互关系。当分辨系数为0.5时,净光合速率与环境因子间关联度的大小顺序为光合有效辐射、叶温、气温、CO₂in、RHin、RHout和CO₂out。当分辨系数为0.1、0.3、0.5时,比较净光合速率与环境因子间关联序的差异(见表4)发现,分辨系数的改变对光合有效辐射的顺序没有影响,对CO₂in和CO₂out的影响较小,对RHin、

RHout、气温和叶温的影响较大。

CO₂out和光合有效辐射与净光合速率的简单相关较强,相关系数达显著或极显著水平,其他环境因子的简单相关相对较弱。净光合速率与RHin、RHout、CO₂in和CO₂out间的偏相关系数达显著或极显著水平,其他环境因子的偏相关不显著。

在弱光照时辣椒净光合速率与环境因子间的途径分析结果列入表5。RHin和CO₂out对净光合速率的直接作用为负效应,其他环境因子的直接作用为正效应。光合有效辐射、RHin、RHout、气温和叶温的直接作用小于间接作用,间接作用以CO₂in和CO₂out的作用为主;CO₂in和CO₂out的直接作用和间接作用都较大,CO₂in的间接效应是通过CO₂out的作用为主,CO₂out的间接效应是通过CO₂in的作用为主。

表4 弱光照下辣椒净光合速率与环境因子间的灰色关联分析和相关分析¹⁾

Table 4 Grey relational analysis and correlation analysis between net photosynthesis rate of *Capsicum annuum* Linn. and environment factors under weak light¹⁾

参数 Parameter	关联系数 Association coefficient	关联序 Correlation order			相关系数 Correlation coefficient	
	0.5	0.1	0.3	0.5	简单相关 Simple correlation	偏相关 Partial correlation
PAR	0.626 86	1	1	1	0.307 2 *	0.239 1
RHin	0.622 17	2	3	5	-0.221 9	-0.355 8 *
RHout	0.622 11	3	5	6	-0.242 2	0.372 3 *
CO ₂ in	0.622 24	5	4	4	0.030 4	0.998 2 * *
CO ₂ out	0.621 91	6	7	7	-0.648 4 * *	-0.999 2 * *
Ta	0.622 27	7	6	3	0.292 1	0.224 2
TI	0.622 51	4	2	2	0.247 3	0.212 6

¹⁾ PAR: 光合有效辐射 Photosynthesis available radiation; RHin: 进气口的相对湿度 Relative humidity in leaf; RHout: 通过叶室后出来气体的相对湿度 Relative humidity out leaf; CO₂in: 进气口的CO₂浓度 CO₂ concentration in leaf; CO₂out: 通过叶室后出来气体的CO₂浓度 CO₂ concentration out leaf; Ta: 叶室内的环境温度即气温 Air temperature; TI: 叶温 Leaf temperature. *: P < 0.05; * *: P < 0.01.

表5 弱光照下辣椒净光合速率与环境因子间的途径分析¹⁾

Table 5 Path analysis between net photosynthesis rate of *Capsicum annuum* Linn. and environment factors under weak light¹⁾

参数 Parameter	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect						
		PAR	RHin	RHout	CO ₂ in	CO ₂ out	Ta	TI
PAR	0.023 1		0.138 2	-0.186 2	-0.372 4	0.668 1	0.022 1	0.014 3
RHin	-0.304 8	0.010 5		0.342 5	0.961 2	-1.178 7	-0.023 6	-0.008 0
RHout	0.344 7	-0.012 5	-0.302 9		0.950 3	-1.187 5	-0.025 0	-0.009 4
CO ₂ in	1.130 9	-0.007 6	-0.259 1	0.289 6		-1.097 5	-0.020 0	-0.006 1
CO ₂ out	-1.481 5	-0.010 4	-0.242 5	0.276 3	0.837 8		-0.020 7	-0.007 4
Ta	0.028 4	0.018 0	0.253 7	-0.302 5	-0.798 1	1.079 1		0.013 6
TI	0.017 5	0.0189	0.138 8	0.185 3	-0.391 8	0.627 1	0.022 1	

¹⁾ PAR: 光合有效辐射 Photosynthesis available radiation; RHin: 进气口的相对湿度 Relative humidity in leaf; RHout: 通过叶室后出来气体的相对湿度 Relative humidity out leaf; CO₂in: 进气口的CO₂浓度 CO₂ concentration in leaf; CO₂out: 通过叶室后出来气体的CO₂浓度 CO₂ concentration out leaf; Ta: 叶室内的环境温度即气温 Air temperature; TI: 叶温 Leaf temperature.

3 小结和讨论

灰色关联分析结果表明,光照强弱不同,影响辣椒净光合速率的主要环境因子明显不同。当光合有效辐射达 $1\ 300 \sim 1\ 500\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、气温达 $34\ ^\circ\text{C} \sim 38\ ^\circ\text{C}$ 、叶温达 $38\ ^\circ\text{C} \sim 44\ ^\circ\text{C}$ 、蒸腾作用旺盛时,影响净光合速率的首要环境因子是相对湿度,其次是 CO_2 浓度,再次是温度,最后是光照强度和气孔导度。当光合有效辐射只有 $200 \sim 400\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、气温 $31\ ^\circ\text{C} \sim 33\ ^\circ\text{C}$ 、叶温 $34\ ^\circ\text{C} \sim 36\ ^\circ\text{C}$ 、蒸腾作用弱时,影响辣椒净光合速率的首要环境因子是光照强度,其次是温度,再次是相对湿度和 CO_2 浓度,气孔导度和胞间 CO_2 浓度没有影响。相关分析的结果与灰色关联分析的结果基本相似,前者净光合速率与光照强度的相关不显著,与相对湿度、叶温呈显著的负相关,与 CO_2 浓度呈相显著的正相关。后者与光照强度、 CO_2 浓度呈显著的正相关,与温度呈正相关,与相对湿度呈显著的负相关。这些结论说明在高温强光照的晴天,应适当遮阳、灌水、增施 CO_2 肥来促进辣椒的光合作用;在低温的阴雨天气,要尽量减少遮蔽、通风透气,降低相对湿度、增加温度来促进辣椒的光合作用,增加辣椒产量。

当分辨系数为 0.1、0.3、0.5 时,辣椒光合和蒸腾特性与环境因子间的关联序变化的总体差异程度明显不同,分辨系数对强光照作用下净光合速率和水分利用效率关联序的影响较小,分辨系数为 0.5 时的关联序比较符合实际情况,这与邹学校等^[15]在研究辣椒农艺性状与生化特性间的灰色关联度时认为“分辨系数取 0.5 的结果较理想”的结论相符。分辨系数对蒸腾速率和弱光照作用下净光合速率关联序的影响较大,不同分辨系数下的关联序与实际比较,弱光照作用下分辨系数为 0.5 时的净光合速率的关联序比较符合实际情况,但分辨系数为 0.3 时蒸腾速率的关联序比较符合实际情况,这与邹学校等的研究结论不符,原因有待于进一步研究。

灰色关联分析和相关分析的结果表明,影响蒸腾速率的首要环境因子是气孔导度,其次是温度,光照和相对湿度的影响相对较小;影响水分利用效率的首要环境因子是相对湿度,温度、光照和气孔导度的影响相对较小;相对湿度与蒸腾速率呈极显著的

负相关,与水分利用效率呈极显著的正相关;气温与蒸腾速率呈极显著正相关,与水分利用效率呈极显著的负相关;光照与蒸腾速率和水分利用效率的相关不显著。由此可以认为,蒸腾作用主要受温度的影响,温度越高、相对湿度越低,蒸腾作用越强;水分利用率主要受相对湿度的影响,相对湿度越大,温度越低,蒸腾作用越弱,水分利用效率越高;光照主要通过温度来影响蒸腾作用和水分利用效率,这与实际情况相符。

参考文献:

- [1] 匡廷云. 作物光能利用效率与调控[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2004. 58-89.
- [2] 王强, 张其德, 卢从明, 等. 超高产杂交稻不同生育期的光合色素含量、净光合速率和水分利用效率[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 647-651.
- [3] Jiao D M, Huang X Q, Li X, et al. Photosynthetic characteristics and tolerance to photo-oxidation of transgenic rice expressing C4 photosynthesis enzymes[J]. Photosyn Res, 2002, 72: 85-93.
- [4] 吴姝, 张树源, 沈允钢. 昼夜温差对小麦光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 1998, 18(1): 103-109.
- [5] Sharma-natu P, Childiryal M C. Photosynthesis and dry matter production in *T. monococcum* and *T. aestivum* wheat in response to ear removal[J]. J Agron Crop Sci, 1994, 173: 218-224.
- [6] 余渝, 陈冠文, 田笑明, 等. 新疆棉花光合速率的变化特点研究[J]. 新疆农业大学学报, 2001, 24(1): 16-20.
- [7] 戈巧英, 张其德, 郝乃斌, 等. 高光效大豆光合特性研究[J]. 大豆科学, 1994, 13: 85-91.
- [8] 符军, 王军, 高建社, 等. 几个猕猴桃品种净光合速率和蒸腾速率与环境因素的关系[J]. 西北植物学报, 1998, 18(1): 90-96.
- [9] 马德华, 庞金安, 霍振荣, 等. 黄瓜幼苗光合与呼吸特性研究[J]. 园艺学报, 1997, 24(4): 397-398.
- [10] 郁继华, 舒黄杰, 杨秀玲, 等. 茄子光合特性研究再探[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 81-84.
- [11] 李萍萍, 胡永光, 赵玉国, 等. 叶用莴苣温室栽培单株光合作用日变化规律[J]. 园艺学报, 2001, 28(3): 240-245.
- [12] 徐坤, 康立美, 赵红军, 等. 结球莴苣光合特性研究[J]. 园艺学报, 1995, 22(4): 363-366.
- [13] 霍振荣, 庞金安, 杜胜利. 辣椒光合特性研究[J]. 华北农学报, 1998, 13(3): 121-124.
- [14] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 294-304, 614-636.
- [15] 邹学校, 侯喜林, 刘荣云, 等. 辣椒杂种一代生化特性与农艺性状的灰色关联分析[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 349-354.

(责任编辑: 张垂胜)