

叶面喷施 NaCl 对有色薄膜下苗用型 大白菜物质累积的调节效应

王春平¹, 薛占军¹, 王俊玲², 王 梅³, 范 辉¹, 高志奎^{1*}

(1 河北农业大学 园艺学院, 河北保定 071001; 2 河北农业大学 生命科学学院, 河北保定 071001; 3 河北农业大学 科教兴农中心
河北保定 071001)

摘 要:以苗用型大白菜品种‘油绿 3 号’为材料, 设置日光温室内盆栽实验, 在蓝膜(B_{film})、绿膜(G_{film})、黄膜(Y_{film})、红膜(R_{film})、无色膜(W_{film})下进行叶面喷施 0(CK)、12 和 24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的组合处理($B_{\text{film}0}$ 、 $B_{\text{film}12}$ 、 $B_{\text{film}24}$ 、 $G_{\text{film}0}$ 、 $G_{\text{film}12}$ 、 $G_{\text{film}24}$ 、 $Y_{\text{film}0}$ 、 $Y_{\text{film}12}$ 、 $Y_{\text{film}24}$ 、 $R_{\text{film}0}$ 、 $R_{\text{film}12}$ 、 $R_{\text{film}24}$ 、 $W_{\text{film}0}$ 、 $W_{\text{film}12}$ 、 $W_{\text{film}24}$), 测定幼苗的干鲜物质质量、叶面积、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)以及光合色素、可溶性糖和游离氨基酸含量等指标, 以明确有色薄膜下叶面喷施 NaCl 对苗用型大白菜的生长及物质累积的复合调节效应。结果表明: (1) 相同薄膜颜色下, 与对照(0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl)相比, 苗用型大白菜的各项生长指标在 12 和 24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下均不同程度增加, 并以 $Y_{\text{film}12}$ 处理的生长促进效应最大, 其鲜物质质量、干物质质量、叶面积、可溶性糖含量分别比 $W_{\text{film}0}$ 处理显著增加 54.40%、45.06%、38.99% 和 76.77%; $R_{\text{film}12}$ 和 $W_{\text{film}12}$ 处理的生长促进效应较大, 但 $B_{\text{film}12}$ 处理更有利于游离氨基酸和可溶性蛋白质累积以及叶绿素形成。(2) 相同盐浓度条件下(0~24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl), 5 种有色薄膜下苗用型大白菜的干鲜物质累积量以 $Y_{\text{film}0}$ 处理最大, $W_{\text{film}0}$ 处理较大, $R_{\text{film}0}$ 处理较低, $B_{\text{film}0}$ 和 $G_{\text{film}0}$ 处理最低。(3) 叶面喷施 12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 不仅对红膜下可溶性糖含量和蓝膜下光合色素含量的增加会有进一步提升的较强叠加效应, 且对蓝膜下干物质累积、可溶性糖含量、 P_n 和 G_s 以及红膜下叶面积、游离氨基酸含量和可溶性蛋白质含量的降低具有较强的补偿效应。(4) 有色薄膜下苗用型大白菜的干鲜物质质量、可溶性糖含量、光合色素含量以及 P_n 等因变量不仅受到 R:FR 光谱范围参数的直接途径因子调节, 而且受到 R:FR、B:R 光谱比例参数的调节; 叶面积还受到 YR:R:FR、B:Y、B:G 等光谱特征参数的调节。研究发现, 5 种有色薄膜下, 叶面喷施低浓度 NaCl 对苗用型大白菜生长及物质累积均呈现促进效应, 且既有协同叠加效应也有补偿缓解效应, 并以黄膜尤其是黄膜下叶面喷施 12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理对苗用型大白菜生长的促进效应最优。

关键词: 苗用型大白菜; 有色薄膜; NaCl; 光合作用; 光谱; 游离氨基酸

中图分类号: Q945.78; S634.1

文献标志码: A

Regulatory Effects of Foliar Spraying with NaCl on the Accumulation of Biomass in Seedling Chinese Cabbage Grown under Color Plastic Film

WANG Chunping¹, XUE Zhanjun¹, WANG Junling², WANG Mei³, FAN Hui¹, GAO Zhikui^{1*}

(1 College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 2 College of Life Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 3 Centre for the Promotion of Agriculture through Science and Education, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

收稿日期: 2022-05-10; 修改稿收到日期: 2022-09-08

基金项目: 河北省重点研发计划(18226928D)

作者简介: 王春平(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事蔬菜质量与安全的研究。E-mail: 1219847894@qq.com

* 通信作者: 高志奎, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生理与栽培研究。E-mail: gaozhikui2005@163.com

Abstract: The seedling Chinese cabbage variety ‘Youlü No. 3’ was used as the material for pot experiment in a solar greenhouse. Under the blue film(B_{film}), green film(G_{film}), yellow film(Y_{film}), red film(R_{film}) and colorless film(W_{film}), the leaves were foliar sprayed with 0, 12 and 24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl($B_{\text{film}0}$, $B_{\text{film}12}$, $B_{\text{film}24}$, $G_{\text{film}0}$, $G_{\text{film}12}$, $G_{\text{film}24}$, $Y_{\text{film}0}$, $Y_{\text{film}12}$, $Y_{\text{film}24}$, $R_{\text{film}0}$, $R_{\text{film}12}$, $R_{\text{film}24}$, $W_{\text{film}0}$, $W_{\text{film}12}$ and $W_{\text{film}24}$). The dry and fresh matter quality, leaf area, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), photosynthetic pigment, soluble sugar and free amino acid contents of the seedlings were measured, The compound regulation effect of foliar spraying NaCl on the growth and material accumulation of seedling Chinese cabbage under colored film spectrum was analyzed. The results showed that: (1) under the same film color, compared with the control (0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl), the growth indexes of seedling type Chinese cabbage were increased in different degrees under 12 and 24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl treatments, and the growth promotion effect of $Y_{\text{film}12}$ treatment was the largest. The fresh matter mass, dry matter mass, leaf area and soluble sugar content were significantly increased by 54.40%, 45.06%, 38.99% and 76.77%, respectively compared with $W_{\text{film}0}$ treatment; $R_{\text{film}12}$ and $W_{\text{film}12}$ treatments had greater growth promoting effect, but $B_{\text{film}12}$ treatment was more beneficial to the accumulation of free amino acids and soluble proteins and the formation of chlorophyll. (2) Under the same salt concentration (0—24 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl), the dry and fresh matter accumulation of seedling Chinese cabbage under the five colored films was the largest in $Y_{\text{film}0}$ treatment, the larger in $W_{\text{film}0}$ treatment, the lower in $R_{\text{film}0}$ treatment, and the lowest in $B_{\text{film}0}$ and $G_{\text{film}0}$ treatment. (3) Spraying 12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl on the leaf surface not only has a strong superposition effect on the increase of soluble sugar content under the red film and photosynthetic pigment content under the blue film, but also has a strong compensation effect on the decrease of dry matter accumulation, soluble sugar content, P_n and G_s under the blue film, and leaf area under the red film, free amino acid content and soluble protein content. (4) The dry and fresh matter quality, soluble sugar content, photosynthetic pigment content, P_n and other dependent variables of seedling Chinese cabbage under colored film were not only regulated by direct path factors of R and fr spectral range parameters, but also by R : FR and B : R spectral proportion parameters; Leaf area is also regulated by spectral characteristic parameters such as YR, R : FR, B : y and B : G. It was found that under the five colored films, the foliar spraying of low concentration NaCl had a promoting effect on the growth and material accumulation of seedling Chinese cabbage, and there were both synergistic and compensatory effects. The yellow film, especially the foliar spraying of 12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl under the yellow film, had the best promoting effect on the growth of seedling Chinese cabbage.

Key words: seedling Chinese cabbage; colored film; NaCl; photosynthesis; spectrum; free amino acids

近年来,围绕着高浓度盐胁迫(50~300 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl)及耐盐机制开展了大量研究工作^[1]。研究发现钠盐胁迫的调控机制和信号转导与 Na^+ 、 Cl^- 进出细胞质膜和液泡膜的转运蛋白及其编码基因的表达,以及跨膜质子梯度驱动力有密切联系^[2-3]。同时,低浓度 NaCl(1~20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的生长有益效应研究也开始受到关注。试验发现,根际土壤栽培浇灌低浓度 NaCl 可持续促进蓝莓幼苗的生长^[4];在根际营养液栽培烟草^[3](5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、韭菜^[5](12 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、大白菜^[6](5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)中添加低浓度 NaCl,促进了植株叶片的光合能力、干鲜物质量以及营养物质的合成;叶面喷施 5~10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl,可通过提高黄瓜幼苗的叶面积而增加了干物质、可溶性糖、可溶性蛋白质等的累积,同时提高了叶片光合气体交换活性^[7]。

众所周知,光质是调节植物生长发育及作物高产优质的生态因子。目前,有关单色光质对植物生长发育的调节效应研究,主要集中在人工光源 LED 红光或蓝光及其比例、红光与远红光比例方面,并在红光与远红光受体光敏色素、蓝光受体隐花色素,以及相应受体编码基因的表达^[8]方面也开展了大量研究。同时,在自然光谱下,关于有色薄膜对植物生长发育调节及光能高效转化利用的研究也一直在进行中。已有试验观察到,红膜有利于心里美萝卜^[9]、甜椒^[10]、茄子^[11]和草莓^[12]的干物质累积,尤其是可溶性糖的积累;而蓝膜和绿膜对产量形成却有明显的抑制,但蓝膜下果实叶绿素含量、类胡萝卜素含量、抗坏血酸含量、游离氨基酸和可溶性蛋白质的含量最高,而黄膜的效果介于蓝膜与红膜之间。然而,有研究却发现,紫苏干鲜物质量、同化物累积以及叶片

的相对叶绿素含量 (SPAD) 均在黄膜下达到最大^[13]; 八角莲在白色、红色、黄色或蓝色薄膜下培养 90 d, 蓝膜处理提高了叶绿素含量、净光合速率 (P_n)、PS II 最大光化学效率, 而黄膜和红膜则抑制了光合能力, 降低了叶绿素的含量^[14]。

与 LED 单色光谱不同的是, 自然光谱的范围较宽, 主要包括可见光或光合有效辐射 (400~700 nm) 中蓝光 (400~500 nm)、绿光 (500~600 nm)、红光 (600~700 nm) 和远红光 (700~800 nm) 共 4 大部分^[15], 会产生众多的光谱特征参数, 包括光谱范围参数和光谱比例参数。这些众多的光谱特征参数对植物生长及生理活性的调节效应与红、蓝、远红光等单色光谱及其比例有关, 还会有一些光谱特征参数的调节 (或辅助调节) 效应有待明确。另外, 通过对比发现, 在干鲜物质、营养物质、叶面积和光合能力等指标方面, 光谱效应与低浓度 NaCl 的生长有益效应有诸多相近或相似之处。那么, 在有色薄膜光谱下低浓度 NaCl 能否对植物生长和生理活性产生协同叠加调节或补偿调节等效应有待观察。

苗用型大白菜, 简称苗用大白菜、苗用白菜或快白菜, 以地上部为主要食用器官。本试验采用有色薄膜与叶面喷施低浓度 NaCl 的组合处理方案, 测定分析苗用型大白菜地上部株高、植株生物量、光合色素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、光合气体交换等指标, 明确有色薄膜光谱下叶面喷施 NaCl 对苗用型大白菜生长的影响, 探索有色薄膜下众多光谱参数对植物生长的复合调节效应, 及其与低浓度 NaCl 的协同叠加调节或补偿调节效应。

1 材料和方法

1.1 试材培养

试验于 2021 年 5 月在河北农业大学东校区日光温室内进行。试验材料为河北农业大学育种团队研发‘油绿 3 号’大白菜 (*Brassica chinensis* L.)。采用 50 孔穴盘直播, 幼苗 2 叶 1 心时移栽至黑色塑料育苗钵 (13 cm×12 cm)。基质为有机通用型栽培基质 ($N+P_2O_5+K_2O\geq 2\%$, 有机质 $\geq 40\%$, 淮安市中禾农业科技开发有限公司)。幼苗移栽 3 d 后, 挑选整齐一致的幼苗转入 5 个覆盖有色薄膜的小拱棚, 同时每天上午 8:00~8:30 进行 NaCl 叶面喷施处理。有色薄膜下叶面喷施 NaCl 处理约 2 周后取样进行各项指标测定。

1.2 试验处理

在日光温室内搭建小拱棚, 棚高 70 cm, 棚宽

120 cm, 棚长 160 cm, 棚向为东西延长。棚顶面分别覆盖蓝 (B_{film})、绿 (G_{film})、黄 (Y_{film})、红 (R_{film}) 和无色 (W_{film}) 5 种有色薄膜 (山东塑洋有限公司生产)。将棚膜底部卷起 12 cm 以形成良好的通风状态, 用以保持小拱棚之间棚温一致。以田间每个有色薄膜小拱棚为小区, 随机区组排列, 3 次重复。

为了便于研究植物生长和代谢的光谱调节效应, 将 5 种有色薄膜在 400~800 nm 范围内的光谱透过率 (图 1) 分解成 23 个光谱特征参数 (表 1)。首先, 将有色薄膜在 400~800 nm 范围内的光谱透光率简化成 B (400~499 nm)、G (500~549 nm)、Y (550~599 nm)、R (600~699 nm)、FR (700~800 nm) 共 5 个光谱范围参数。然后, 在此基础上拓展出 4 个复合光谱范围参数 (BG、YR、W、WFR), 并且计算出 14 个光谱比例参数。

依据预备试验结果, 在 5 种有色薄膜 (B_{film} 、 G_{film} 、 Y_{film} 、 R_{film} 、 W_{film}) 下均设置 3 个 NaCl 浓度处理 (0、12 和 24 mmol·L⁻¹), 共组成 15 (5×3) 个处理组合, 即 B_{film0} 、 G_{film0} 、 Y_{film0} 、 R_{film0} 、 W_{film0} 、 B_{film12} 、 G_{film12} 、 Y_{film12} 、 R_{film12} 、 W_{film12} 、 B_{film24} 、 G_{film24} 、 Y_{film24} 、 R_{film24} 、 W_{film24} 。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标 在各有色薄膜光谱下, 苗用型大白菜叶面喷洒 NaCl 约 2 周后, 于每重复小区随机取样, 进行株高、叶面积等形态指标测定。同时, 测量地上部鲜物质量, 然后在烘箱中 105℃ 下杀青 0.5 h 后, 转至 75℃ 烘干至恒重, 分别称取干物质量。据此计算叶片的肉质性^[3]和含水量。

叶片肉质性 (g·cm⁻²) = (鲜物质量 - 干物质量) / 叶片面积;

叶片含水量 = 鲜物质量 - 干物质量。

1.3.2 营养物质和光合色素含量 随机选取苗用型大白菜地上部的叶片, 采用硫酸蒽酮法测定可溶

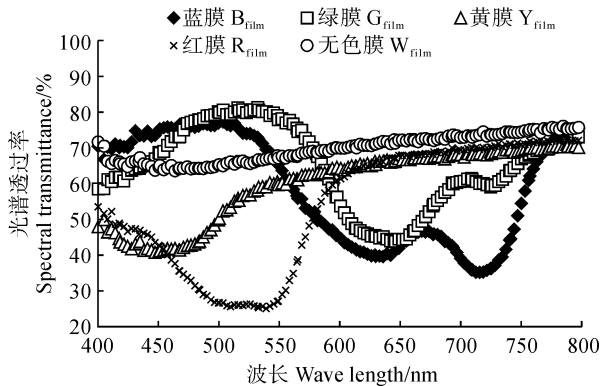


图 1 有色薄膜的光谱透过率

Fig. 1 Spectral transmittance of colored film

表 1 不同有色薄膜下的光谱特征参数
Table 1 Spectral characteristic parameters of colored films

光谱特征参数 Spectral characteristic parameter	波长 Wave length/nm	蓝膜 B _{film}	绿膜 G _{film}	黄膜 Y _{film}	红膜 R _{film}	无色膜 W _{film}
蓝光 Blue(B)	400~499	0.74	0.69	0.44	0.41	0.65
绿光 Green(G)	500~549	0.73	0.75	0.59	0.36	0.67
黄光 Yellow(Y)	550~599	0.53	0.70	0.62	0.46	0.69
红光 Red(R)	600~699	0.43	0.50	0.66	0.67	0.72
远红光 Far-red light(FR)	700~800	0.55	0.66	0.69	0.71	0.75
蓝绿光 Blue-green(BG)	400~549	0.74	0.73	0.48	0.36	0.66
黄红光 Yellow-red(YR)	550~699	0.46	0.56	0.65	0.60	0.71
白光 White(W)	400~699	0.61	0.66	0.58	0.48	0.68
白光和远红光 White and far-red(WFR)	400~800	0.59	0.65	0.60	0.54	0.70
蓝光:红光 B:R		1.72	1.39	0.66	0.61	0.91
绿光:红光 G:R		1.34	1.13	0.86	0.51	0.90
黄光:红光 Y:R		0.73	0.96	1.29	1.29	1.05
蓝光:绿光 B:G		1.01	0.92	0.74	1.13	0.97
蓝光:黄光 B:Y		1.38	0.99	0.71	0.89	0.95
绿光:黄光 G:Y		1.37	1.07	0.95	0.78	0.98
蓝绿光:黄红光 BG:YR		1.53	1.21	0.80	0.68	0.95
蓝光:远红光 B:FR		1.35	1.05	0.63	0.58	0.88
绿光:远红光 G:FR		1.34	1.13	0.86	0.51	0.90
黄光:远红光 Y:FR		0.98	1.06	0.90	0.65	0.92
红光:远红光 R:FR		0.78	0.75	0.96	0.94	0.96
蓝绿光:远红光 BG:FR		1.35	1.10	0.69	0.51	0.88
黄红光:远红光 YR:FR		0.85	0.85	0.94	0.85	0.95
白光:远红光 W:FR		1.11	1.00	0.84	0.67	0.92

性糖含量和淀粉含量^[16],水合茚三酮法测定游离氨基酸总量^[16],考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量^[16],2,6-酚靛酚滴定法测定抗坏血酸含量^[16],丙酮浸提法测定叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量^[16]。

1.3.3 光合气体交换参数 采用 CIRAS-II 光合仪测定大白菜从底部数第 4 片真叶的光合气体交换参数。测定时设定叶室温度为 20 ℃,CO₂ 浓度为 380 μmol·mol⁻¹(与外界大气中 CO₂ 浓度相近),光源为红蓝复合光源,比例为 3:1,光照强度为 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹(与设施环境内中午光强相近)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行整理和作图。在 SPSS 26.0 中对试验数据进行方差分析和 Duncan 多重比较($P<0.05$)。同时在 SPSS 26.0 中,将苗

用型大白菜各项指标(因变量 y)与有色薄膜光谱特征参数(自变量 x_i),经过逐步线性回归获得途径因子及直接途径系数 P_{iy}。

2 结果与分析

2.1 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 对苗用型大白菜形态与干鲜物质累积量的影响

表 2 显示,在相同颜色薄膜条件下,与对照(0 mmol·L⁻¹NaCl)相比,苗用型大白菜的各项形态生长指标在 12 和 24 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下均不同程度增加,并以叶面喷施 12 mmol·L⁻¹NaCl 处理的增幅更大且均达到显著水平;在各色薄膜间相比较,NaCl 处理下大白菜的各项形态生长指标的增幅均以蓝膜(B_{film})和红膜(R_{film})较大,两个浓度 NaCl 处理与对照的差异均达到显著水平。其中,与 B_{film0}/R_{film0} 相比,B_{film12}/R_{film12} 的株高、叶面积、肉质

性、鲜物质量、干物质量和含水量分别显著提高 24.5％/16.8％、43.7％/59.9％、188.75％/51.7％、106.9％/65.1％、99.42％/46.01％和 107.44％/66.1％。因此,在 NaCl 处理下,B_{film} 和 R_{film} 对苗用型大白菜幼苗生长的促进效应较好,且以 B_{film12} 和 R_{film12} 处理表现更佳。

在相同盐浓度(0~24 mmol·L⁻¹ NaCl)条件下,苗用型大白菜各项形态生长指标在各色膜处理下的变化趋势基本相同。其中,黄膜处理(Y_{film0}、Y_{film12}、Y_{film24})的叶面积均与相应无色膜处理(W_{film0}、W_{film12}、W_{film24})无显著差异,而其余生长指标均比相应无色膜处理显著增加,且增幅表现为 Y_{film0}>Y_{film12}>Y_{film24},Y_{film12} 处理株高、肉质性、鲜物质量、干物质量和含水量分别比 W_{film12} 处理显著增加 11.75％、33.01％、23.44％、14.81％和 23.95％;G_{film}、B_{film} 各浓度处理和 R_{film0} 处理的叶面积、肉质性、鲜物质量、干物质量和含水量均比相应的 W_{film} 处理显著降低,B_{film0}、B_{film12} 的株高也比相应无色膜显著降低,尤其以膜 B_{film0} 处理的各项形态生长指标下降降幅最大。

以上结果说明,与 W_{film0} 相比,苗用型大白菜生长在黄膜处理下得到显著促进,尤其以 Y_{film12} 处理

的生长促进效应最大;而在红膜、蓝膜和绿膜处理下生长均受到抑制,并以蓝膜的抑制效应最明显;与正常对照(0 mmol·L⁻¹ NaCl)相比,各色薄膜下 12 和 24 mmol·L⁻¹ NaCl 处理均能不同程度促进苗用型大白菜生长,且以 12 mmol·L⁻¹ NaCl 处理促进效应更大,各色膜中又以蓝膜和红膜促进效应更佳,尤其是 B_{film12} 和 R_{film12} 处理有更大的补偿恢复生长效应。

2.2 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 对苗用型大白菜营养物质含量的影响

图 2 显示,在相同颜色薄膜条件下,与对照(0 mmol·L⁻¹ NaCl)相比,苗用型大白菜的各项营养物质(除淀粉外)指标在 12 和 24 mmol·L⁻¹ NaCl 盐浓度下均有不同程度增加,并均以 12 mmol·L⁻¹ NaCl 处理的增幅更大且均达到显著水平;在各色薄膜间相比较,NaCl 处理下大白菜的各项营养物质指标的增幅多以 W_{film} 和 R_{film} 处理较大,两个浓度 NaCl 处理与对照的差异均达到显著水平。其中,与 W_{film0}/R_{film0} 相比,W_{film12}/R_{film12} 处理的可溶性糖、游离氨基酸、可溶性蛋白质和抗坏血酸含量分别增加了 60.39％/42.89％、18.1％/10.04％、6.46％/0.25％和 80.5％/27.9％;类胡萝卜素含量

表 2 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 浓度对苗用型大白菜形态与干鲜物质累积量的影响(单株)

Table 2 Effects of foliar spraying with various concentration NaCl under colored film on morphology and biomass of seedling Chinese cabbage (single plant)

处理 Treatment	NaCl 浓度 NaCl concentration /(mmol·L ⁻¹)	株高 Plant height /cm	叶面积 Leaf area /cm ²	肉质性 Succulence /(g·cm ⁻²)	鲜物质量 Fresh biomass /g	干物质量 Dry biomass /g	含水量 Water content /g
B _{film0}	0	22.26±1.15f	503.88±32.33g	0.034±0.002h	17.51±1.33g	1.04±0.07i	16.47±1.34g
B _{film12}	12	27.72±0.70cd	724.10±59.31de	0.098±0.010cd	36.24±2.24d	2.07±0.20de	34.17±2.24d
B _{film24}	24	27.46±0.94cd	656.37±51.26ef	0.078±0.009e	32.54±0.87e	1.66±0.13gh	30.88±0.84e
G _{film0}	0	26.48±1.15de	593.68±62.73f	0.064±0.005g	27.60±0.88f	1.46±0.20h	26.14±0.70f
G _{film12}	12	29.78±0.73b	694.28±73.57e	0.092±0.010de	36.08±2.21d	1.84±0.14fg	34.24±0.59d
G _{film24}	24	28.04±0.57c	675.68±54.24ef	0.079±0.004de	34.18±2.62de	1.63±0.10gh	32.54±0.57de
Y _{film0}	0	29.42±0.41b	838.37±39.80bc	0.124±0.014b	47.61±2.25b	2.28±0.19bcd	45.32±2.28b
Y _{film12}	12	32.90±0.37a	1 093.36±52.33a	0.137±0.010a	56.34±0.83a	2.79±0.21a	53.56±0.69a
Y _{film24}	24	31.82±0.46a	879.23±87.15b	0.108±0.011b	45.31±0.41b	2.19±0.24cd	43.12±0.28b
R _{film0}	0	25.74±2.28e	654.74±24.56ef	0.066±0.009g	29.09±4.86f	1.58±0.17h	27.51±4.87f
R _{film12}	12	30.06±0.63b	1 046.99±38.46a	0.101±0.004cd	48.02±0.56b	2.31±0.08bc	45.71±2.26b
R _{film24}	24	27.96±1.53c	902.20±50.78b	0.086±0.005c	41.61±0.65c	1.95±0.13ef	39.66±2.63c
W _{film0}	0	26.56±0.47de	786.64±24.56cd	0.085±0.008ef	36.49±3.73d	1.92±0.18ef	34.57±3.56d
W _{film12}	12	29.44±0.70b	1 017.71±24.56a	0.103±0.006b	45.64±2.24b	2.43±0.20b	43.21±2.32b
W _{film24}	24	27.52±0.94cd	897.77±70.50b	0.093±0.010c	40.86±0.87c	2.14±0.13cde	38.72±1.35c

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著(P<0.05),下同
Note: Different normal letters in the same column indicate significant differences between treatments at 0.05 level (P<0.05), the same as below

的增幅以无色膜(W_{film})和黄膜(Y_{film})较大, $W_{\text{film}12}/Y_{\text{film}12}$ 处理比相应 $W_{\text{film}0}/Y_{\text{film}0}$ 处理显著增加了 91.14%/56.39%。因此, $W_{\text{film}12}$ 和 $R_{\text{film}12}$ 处理对营养物质累积的促进效应更大。

在相同盐浓度($0\sim24\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$)条件下,苗用型大白菜各项营养物质指标在有色膜处理下的变化趋势呈现差异调节效应。其中,与 $W_{\text{film}0}$ 相比,有色膜下营养物质指标增幅最大的分别是 $Y_{\text{film}12}$ 处理的可溶性糖含量(76.77%)、 $B_{\text{film}12}$ 处理的游离氨基酸含量(28.41%)、 $W_{\text{film}12}/B_{\text{film}12}$ 处理的可溶性蛋白质含量(6.46%/5.82%)、 $W_{\text{film}12}$ 处理的抗坏血酸含量(80.5%)以及 $B_{\text{film}12}$ 、 $G_{\text{film}12}$ 、 $Y_{\text{film}12}$ 处理的类胡萝卜素含量(平均增加 154.42%),而 $R_{\text{film}12}$ 处理的类胡萝卜素含量也与 $W_{\text{film}0}$ 相比增幅达 100.59%。

另外,苗用型大白菜的淀粉含量在 B_{film} 和 G_{film}

下表现为各浓度盐处理均不同程度地低于正常对照($0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$),但差异均未达到显著水平,而在其余颜色膜(Y_{film} 、 R_{film} 、 W_{film})下均表现为盐处理显著高于正常对照,且 $24\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 处理增幅均显著高于 $12\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 处理;在相同的盐浓度条件下,大白菜的淀粉含量表现为各有色膜均低于相应无色膜(W_{film})处理,且差异多达到显著水平。

以上结果表明,与 $W_{\text{film}0}$ 相比, $Y_{\text{film}12}$ 处理最有利于苗用型大白菜可溶性糖累积, $B_{\text{film}12}$ 处理有利于游离氨基酸和可溶性蛋白质累积, $W_{\text{film}12}$ 处理有利于可溶性蛋白质和抗坏血酸累积,而 4 种有色薄膜处理($B_{\text{film}12}$ 、 $G_{\text{film}12}$ 、 $Y_{\text{film}12}$ 、 $R_{\text{film}12}$)均有利于类胡萝卜素累积,却以 $Y_{\text{film}12}$ 和 $W_{\text{film}12}$ 的促进效应最佳;与正常对照相比,有色薄膜下 $12\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaCl}$ 处理均能不同程度促进苗用型大白菜营养物质的合成,

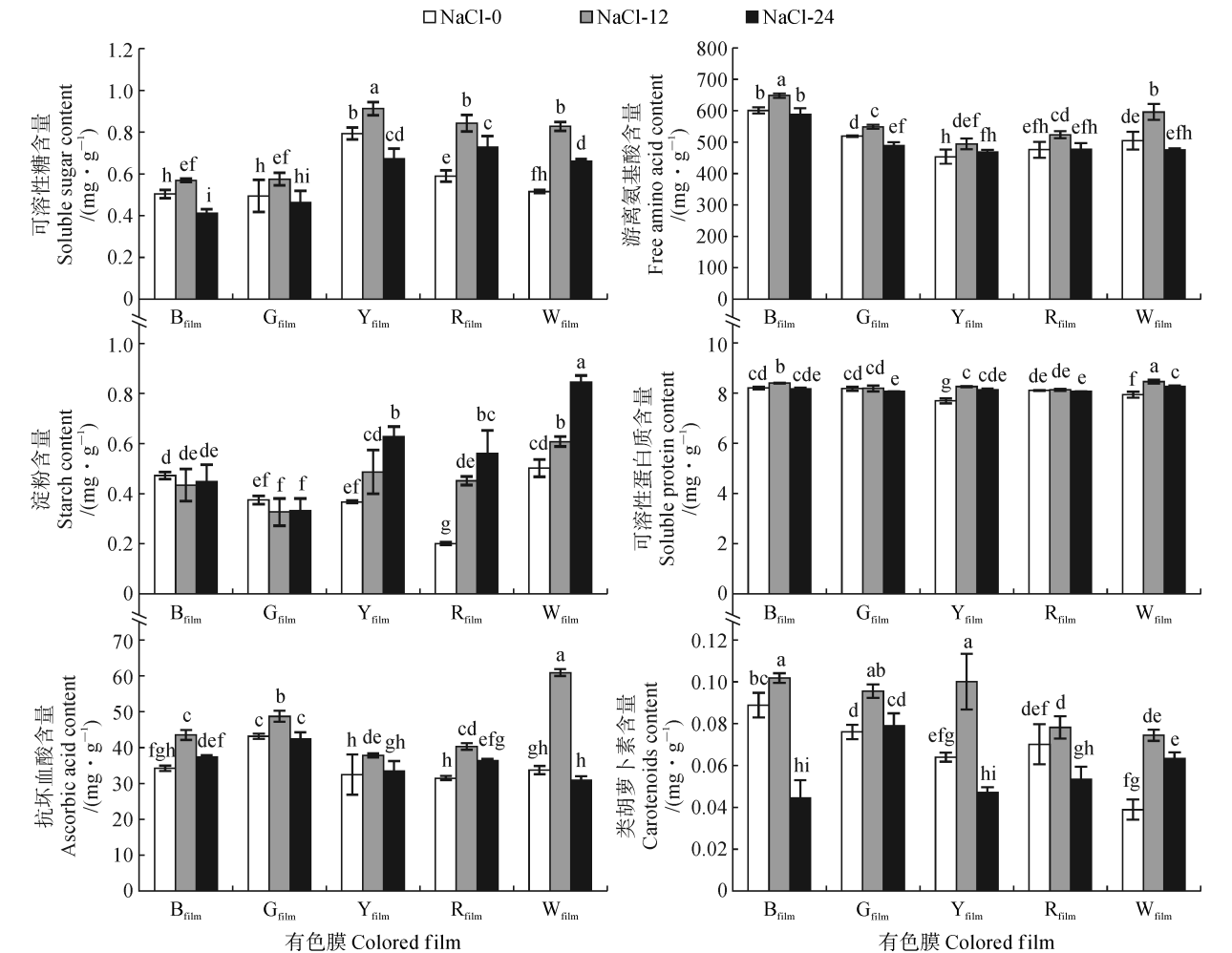


图 2 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 浓度对苗用型大白菜叶片营养物质含量的影响
Fig. 2 Effect of foliar spraying with various concentration NaCl under colored film on nutrients content in seedling Chinese cabbage leaf

而 24 mmol · L⁻¹ NaCl 处理对苗用型大白菜营养物质的促进效应较小,甚至达到了抑制水平,各色膜中又以无色膜和红膜促进效应更佳,尤其是 B_{film12} 和 R_{film12} 处理有更大的叠加促进效应。

2.3 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 对苗用型大白菜叶片叶绿素含量的影响

图 3 显示,在相同薄膜颜色条件下,与对照(0 mmol · L⁻¹ NaCl)相比,苗用型大白菜的叶片叶绿素含量以 12 mmol · L⁻¹ NaCl 处理的增幅更大且均达到显著水平;与 W_{film0} 相比,W_{film12} 处理的叶绿素 a 和叶绿素 b 增幅最大,分别达到 34.56% 和 25.08%,其次是 G_{film12} 处理。在相同的盐浓度条件下,苗用型大白菜叶绿素含量在各色膜处理下的变化趋势相同;与 W_{film0} 相比, B_{film} 处理下的叶绿素 a 和 b 增加较多。以上结果表明,与 W_{film0} 相比,B_{film12} 处理有利于叶绿素 a 和 b 含量的合成,而 NaCl 处理会在 5 种有色薄膜尤其是无色膜(W_{film12})下对叶绿素的合成有更佳的叠加促进效应。

2.4 有色薄膜下 NaCl 叶面喷施对苗用型大白菜叶片净光合速率和气孔导度的影响

图 4 显示,在相同的薄膜颜色条件下,与对照(0 mmol · L⁻¹ NaCl)相比,12 mmol · L⁻¹ NaCl 处理苗用型大白菜的 P_n 和 G_s 在 B_{film}、G_{film} 和 W_{film} 下均显著增加,在 Y_{film} 和 R_{film} 下多无显著变化,而 24 mmol · L⁻¹ NaCl 处理苗用型大白菜的 P_n 和 G_s 大多无显著变化;与 B_{film0}/G_{film0} 相比, B_{film12}/G_{film12} 的 P_n 和 G_s 分别显著增加了 46.78%/87.70% 和 22.61%/67.74%。在相同盐浓度条件下,各有色薄膜下苗用型大白菜的 P_n 和 G_s 与无色膜(W_{film})相比均呈现出降低趋势,并以 B_{film0} 处理下的 P_n 和 G_s 降低幅度最大,分别达到 38.22% 和 40.76%。以上结果表明,苗用型大白菜光合气体交换活性于无色膜下维持在较高水平;与正常对照(0 mmol · L⁻¹ NaCl)相比,各色膜中以蓝膜和绿膜下盐处理的促进效应更佳,尤其是 B_{film12} 和 R_{film12} 处理有更大的叠加促进效应。

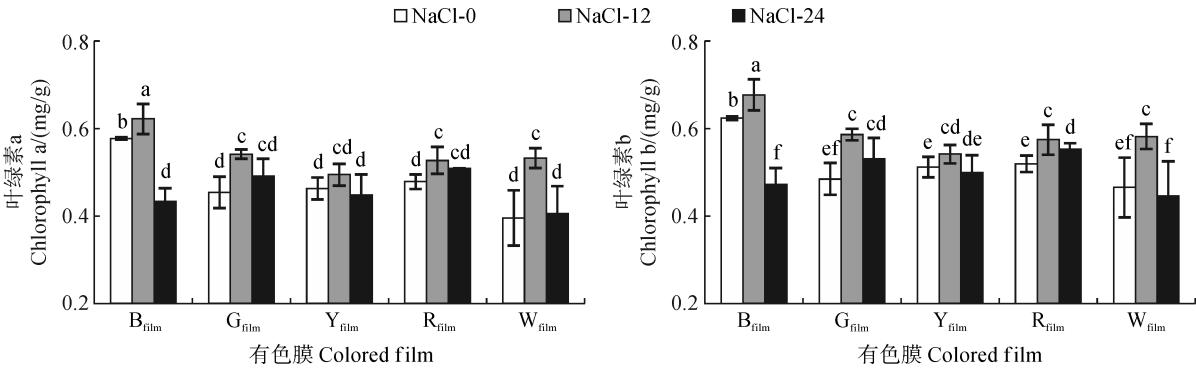


图 3 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 浓度对苗用型大白菜叶片叶绿素含量的影响
Fig. 3 Effect of foliar spraying with various concentration NaCl under colored film on chlorophyll content in seedling Chinese cabbage leaf

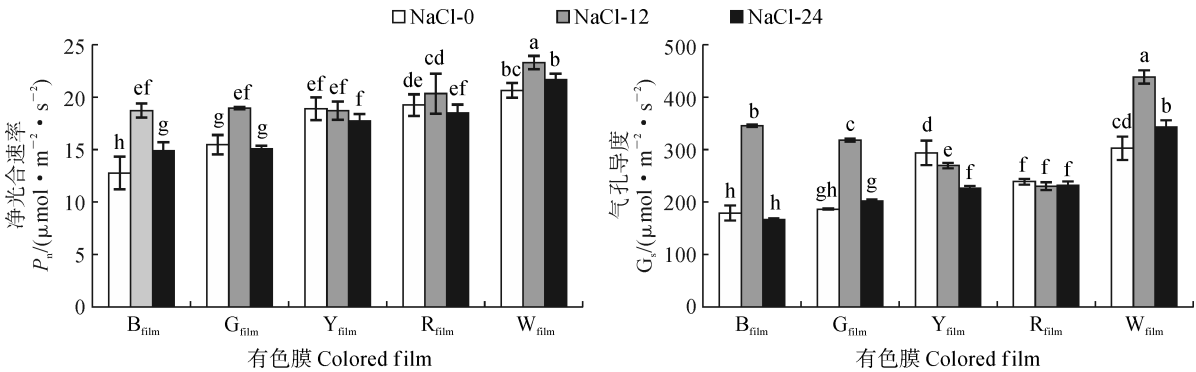


图 4 有色薄膜下叶面喷施 NaCl 浓度对苗用型大白菜叶片净光合速率和气孔导度的影响
Fig. 4 Effect of foliar spraying with various concentration NaCl under colored film on P_n and G_s of seedling Chinese cabbage leaf

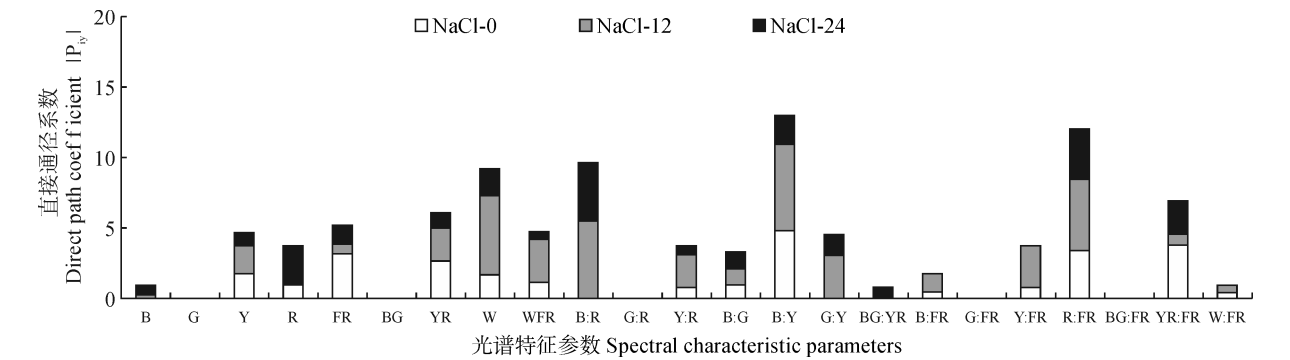


图 5 光谱特征参数的直接通径系数 $|P_{iy}|$ 堆积图

Fig. 5 Direct Path coefficients of spectral characteristic parameters $|P_{iy}|$ stacking diagram

2.5 苗用型大白菜各项指标对有色薄膜光谱特征参数的通径分析

苗用型大白菜各项指标(因变量 y)与有色薄膜光谱特征参数(自变量 x_i),经过逐步线性回归获得的通径因子及直接通径系数 P_{iy} (表 3)。其中,苗用型大白菜的株高、叶片肉质性、鲜物质量、干物质量、含水量、可溶性糖、游离氨基酸、可溶性蛋白质、抗坏血酸、气孔导度等在 $0\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 时主要受到 $B:Y$ 、 $R:FR$ 、 $YR:FR$ 为核心的通径因子调节,而在 $12 \sim 24\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 时则增添了 $B:R$ 、 $B:G$ 、 $G:Y$ 等通径因子的调节。然而,苗用型大白菜的叶面积、淀粉、类胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b、净光合速率等因变量在 $0\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 时主要受到 Y 、 YR 、 R 、 FR 、 W 、 $Y:FR$ 、 $R:FR$ 、 $YR:FR$ 为核心的多个通径因子调节,而在 $12 \sim 24\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 时则转向为受到 $B:Y$ 、 $Y:R$ 、 $R:FR$ 为核心的通径因子调节。

进一步将表 3 的直接通径系数 $|P_{iy}|$ 以有色薄膜光谱特征参数(自变量 x_i)为横轴进行堆积作图(图 5),从中可以看出,对苗用型大白菜生长及物质累积调节较为重要的光谱比例参数有 $B:Y$ 、 $R:FR$ 、 $YR:FR$ 、 $B:R$ 等,较为重要的光谱范围参数有 W 、 YR 、 FR 、 Y 、 R 等。

3 讨 论

本试验在无色膜(W_{film})下观察到叶面喷施 $12\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 对苗用型大白菜的干鲜物质累积、叶片肉质性、叶面积、叶绿素含量及光合活性有显著促进调节效应,与以往在烟草^[3]、黄瓜幼苗^[7]、韭菜^[5,17]、荞麦菜^[18]、高粱^[19]等植物的相关研究报道相一致。同时,在无 NaCl($0\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理下,观察到蓝膜下苗用型大白菜生长量小,干物质累积少,光合能力弱,而其可溶性蛋白质、游离氨基酸

和叶绿素含量高,这与前人在茄子^[11]、甜椒^[10,20-21]、草莓^[22]、茼蒿^[23-24]、菊花^[25-26]、金线兰^[26]等观察到的结果相一致。本试验还观察到各色膜对苗用型大白菜的株高、干鲜物质量、叶面积、叶片肉质性的促进效应表现为黄膜>无色膜>红膜>绿膜>蓝膜。这种在黄膜下植株生长的最佳促进效应在紫苏^[13]上也曾被验证过。尽管一些试验证实了植物在红膜、蓝膜下的营养物质累积各具优势,可是植物在无色膜下的生长优势仍是被多数试验结果所支持。相关研究表明,茄子^[11]、甜椒^[10,20-21]、草莓^[22]、茼蒿^[23-24]和紫苏^[13]等多种作物在无色膜下的生长效应均优于红膜和蓝膜。本试验也同样观察到苗用型大白菜在无色膜下的生长效应(株高、干鲜物质量、含水量、叶面积、叶片肉质性)优于红膜和蓝膜。

同时,本试验发现,尽管苗用型大白菜在 $B_{\text{film}0}$ 处理下的游离氨基酸、可溶性蛋白质、光合色素含量以及 $R_{\text{film}0}$ 处理下的可溶性糖含量均升高(调优效应点),可是 $B_{\text{film}12}$ 处理下游离氨基酸、可溶性蛋白质、光合色素含量以及 $R_{\text{film}12}$ 处理下可溶性糖含量会进一步升高(进一步调优)。这体现了叶面喷施 NaCl 对有色薄膜处理在调优效应点上的协同叠加效应。本试验也观察到,尽管 $B_{\text{film}0}$ 处理大白菜的可溶性糖含量略微下降和 $R_{\text{film}0}$ 处理的大白菜游离氨基酸含量下降(下调效应点),可是 $B_{\text{film}12}$ 处理的可溶性糖含量和 $R_{\text{film}12}$ 处理的游离氨基酸含量均有所回升(补偿调优)。这体现了叶面喷施 NaCl 对有色薄膜处理在下调效应点上的补偿缓解效应。因此,有色薄膜处理下引入低浓度 NaCl 叶面喷施处理,对有色薄膜的调优效应点和下调效应点有进一步提升,即通过二者的协同叠加效应或补偿缓解效应获得综合调优效应。无论如何,叶面喷施 $12\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 对无色膜下苗用型大白菜可溶性糖、游离氨基酸、光合色素含量的协同叠加效应最大,对红膜下可

表 3 通径因子及直接通径系数
Table 3 Path factor and direct path coefficient

因变量 Dependent variable (y)		自变量 x_i (直接通径系数 P_{iy})Independent variable x_i (Direct path coefficient P_{iy})							
		0 mmol • L ⁻¹ NaCl		12 mmol • L ⁻¹ NaCl		24 mmol • L ⁻¹ NaCl			
株高 Plant height		B : Y(-1.16)	W : FR(0.40)	B : Y(-1.35)	FR(-0.70)	YR : FR(0.20)	B : G(-0.9)	W(-0.53)	
叶面积 Leaf area		YR(0.73)	B : G(-0.28)	R : FR(0.78)	B(-0.24)		R(0.87)		
叶片肉质性 Succulence		B : Y(-0.44)	B : G(-0.48)	R : FR(0.33)	B : G(-1.18)	Y : FR(-1.20)	W : FR(0.53)	WFR(-0.52)	
鲜物质量 Fresh quality		B : Y(-0.85)	YR : FR(0.72)	YR(-0.47)	B : R(-2.74)	G : Y(1.54)	R : FR(-0.48)	B : R(-1.61)	G : Y(0.74)
干物质量 Dry matter mass		B : Y(-0.60)	YR : FR(0.47)	R : FR(1.14)	B : G(-0.46)	YR(-0.46)	R : FR(0.81)		
含水量 Water content		B : Y(-0.85)	YR : FR(0.72)	YR(-0.48)	B : R(-2.74)	G : Y(1.53)	R : FR(-0.50)	B : R(-1.59)	G : Y(0.72)
可溶性糖 Soluble sugar		R : FR(-1.04)	Y : R(-0.76)	B : FR(0.46)	R : FR(0.82)	Y : R(1.52)	B : FR(1.28)	B : R(-0.95)	
游离氨基酸 Free amino acid		B : Y(0.94)		B : Y(1.37)	YR(0.60)		B : Y(0.53)	FR(-0.92)	R(0.48)
可溶性蛋白质 Soluble protein		YR : FR(-1.11)	WFR(1.11)	Y(-0.68)	W(1.75)	Y(-1.57)	YR : FR(0.58)	YR : FR(1.04)	B : Y(0.71)
抗坏血酸 Ascorbic acid		R : FR(-1.47)	YR(0.96)	WFR(1.36)	WFR(1.36)	B : G(0.35)	Y(-0.41)	R : FR(-1.46)	BG : FR(-0.79)
淀粉 Starch		W(1.68)	Y(-1.07)	YR : FR(0.33)	R : FR(1.34)	Y : R(-0.80)	R : FR(1.32)	B(0.68)	
类胡萝卜素 Carotenoids		FR(-0.97)	Y : FR(-0.38)	B : Y(0.89)	B : Y(0.89)		W(-0.67)		
叶绿素 a Chlorophyll a		FR(-0.99)	Y : FR(-0.38)	B : Y(0.89)	B : Y(0.89)		YR : FR(0.31)	B : G(-0.26)	Y(-0.92)
叶绿素 b Chlorophyll b		FR(-1.20)	R : FR(0.55)	B : Y(0.89)	B : Y(0.89)		W(-0.69)		
净光合速率 Net photosynthetic rate		R(0.94)		YR(1.29)	B : Y(0.74)	B : G(0.32)	R(1.42)	Y : R(-0.67)	
气孔导度 Stomatal conductance		R : FR(0.45)	YR : FR(0.44)	W(3.87)	Y : FR(-1.78)	WFR(-1.72)	YR(1.10)	B : Y(0.79)	FR(0.42)

注:表中的直接通径系数均达到 0.05 显著水平
Note: the direct path coefficients in the table have reached a significant level of 0.05

溶性糖含量和蓝膜下光合色素含量的协同叠加效应次之;叶面喷施 $12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 对苗用型大白菜蓝膜下干物质累积、 P_n 、 G_s ,红膜下叶面积和黄膜下可溶性蛋白质含量的补偿缓解效应最大,对红膜下游离氨基酸和可溶性蛋白质含量以及蓝膜下可溶性糖含量的补偿缓解效应较大。研究表明,不仅蓝光、红光和远红光等关键光谱,经光受体的光敏素、隐花素和向光素捕捉光信息后的信号转导调节着形态建成、叶绿体发育、碳氮代谢、色素生物合成、气孔运动等^[8],而且 Na^+ 和 Cl^- 吸收进入植物体内既调节着相关转运蛋白及其基因表达^[2],又通过降低渗透势调节着细胞质和液泡的水分状况^[3]、氮代谢的初级同化活性^[5]、天冬酰胺合成酶^[3]、淀粉酶活性^[3]等,均会关联着从信号转导到生化、生理乃至形态响应的一系列过程。因此,有色薄膜光谱与叶面喷施低浓度 NaCl 的叠加效应与补偿缓解效应的相关机制,有待深入研究。

迄今,以 LED 人工光源开展的光质(400~800 nm)对植株生长发育调节效应的研究,主要集中在蓝光(B,400~500 nm)、红光(R,600~700 nm)和远红光(FR,700~800 nm)的光谱范围参数,以及 B : R、R : FR 的光谱比例参数上。一般来说,LED 红光有利于干物质累积^[27],LED 蓝光能提高植株叶绿素的含量^[28];Hogewoning 等^[29]发现 B : R 逐渐增加,直至 B : R=1 的处理下,黄瓜叶片光合能力($A_{\max}$)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、叶绿素浓度均增高。类似地,Savvides 等^[30]和 Hernández R. 等^[31]也发现随 B : R 的增加,黄瓜叶片的光合速率和叶绿素浓度增加;推测这与研究发现叶绿体中存在一种特殊的蓝光受体——玉米黄质有关,玉米黄质进而使蓝光在促进气孔开放方面具有更高的量子效率^[15]。在低 R : FR 下,植株会呈现为典型的避荫反应,即下胚轴、茎、节间以及叶柄伸长、叶片薄大等^[32-33]。而这种避荫反应归因于植物体内普遍存在的 R 和 FR 受体光敏色素的调控^[30]。同时,一些研究还将光谱范围拓展到绿光(500~600 nm)^[34]。

Meng 等^[35]在 LED 红蓝复合光下,通过绿光部分替代蓝光(即改变了 B : G 比例)观察到,随着 B : G 的降低,莴苣干物质累积和叶面积增加。

事实上,有色薄膜下的太阳光谱在 400~800 nm 范围内,除了含有 B、R、FR 的光谱范围参数和 B : R、R : FR 的光谱比例参数外,还包括绿光(G,500~550 nm)、黄光(Y,550~600 nm)及诸多光谱比例参数,如 B : Y、B : G、G : Y、YR : FR、Y : FR 等。本研究经通径分析结果显示,在 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 时,苗用型大白菜的 P_n 、类胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b 等因变量主要受到 R、FR 为核心的通径因子调节;这与前人研究发现草莓叶片中类胡萝卜素受到 R、FR 的影响一致,且类胡萝卜素合成的调控可能与光敏色素相关^[36]。在 $12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理时,苗用型大白菜的鲜物质量、干物质量、可溶性糖含量等因变量主要受到 R : FR 为核心的通径因子调节,而鲜物质量还受到 B : R 的通径因子调节。苗用型大白菜的叶面积受到 YR 和 B : G 的通径因子调节($0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$),也受到 B 和 R : FR 的通径因子调节($12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$)。另外,蓝光 B 主要以 B : Y、B : G 的光谱比例参数对苗用型大白菜叶面积、鲜物质量、干物质量和游离氨基酸含量等因变量呈现通径因子调节。这与参与蓝光反应的光受体隐花色素、向光素和玉米黄质有密切的联系^[37]。然而,B : Y、B : G 对植物生长及代谢的调节作用有待于深入研究。

综上所述,在 5 种有色薄膜光谱下,叶面喷施低浓度 NaCl 通过协同叠加效应和补偿缓解效应对苗用型大白菜生长及干鲜物质累积均呈现出促进效应,且黄膜(Y_{film})尤其是黄膜下叶面喷施 $12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理($Y_{\text{film}12}$)的促进效应最优。通径分析显示有色薄膜下苗用型大白菜的生长及生理活性不仅受到 R、FR 光谱范围参数的调节,而且受到 B : R、R : FR 光谱比例参数的调节,还受到 YR、B : Y、B : G 等光谱特征参数的调节。

参考文献:

- [1] 常丽丽,韩冰,王海燕,等.盐芥响应盐胁迫的分子机制研究进展[J].西北植物学报,2011,31(12):2565-2571.
CHANG L L, HAN B, WANG H Y, *et al.* Advance in molecular responsive mechanisms of *Thellungiella halophila* under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sini-*ca, 2011,31(12):2565-2571.
- [2] 印莉萍,黄勤妮,吴平.植物营养分子生物学及信号转导[M].2版.北京:科学出版社,2006:1-57,310-353.
- [3] OLMENERO-FLORES J M, FRANCO-NAVARRO J D, CUBERO-FONT P, *et al.* Chloride as a beneficial macronutrient in higher plants: New roles and regulation[J]. *International Journal*

of *Molecular Sciences*, 2019,**20**(19): 4 686.

[4] ZHANG X T, JIA W F, WEI X Q, *et al.* Dynamic variation of growth morphology and physiological and biochemical indexes of Blue berry Seedlings under NaCl treatment. [EQ/OL]. *Journal of agriculturalsciences*1-8, [2021-09-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1376.S.20210525.1029.004.html>.

[5] 王俊玲,王 梅,高 露,等. 营养液中添加氯化钠降低硫浓度对非菜硝酸盐累积的减控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020,**26**(6): 1 135-1 145.

WANG J L, WANG M, GAO L, *et al.* Decrement of nitrate accumulation in Chinese chives through adding NaCl and reducing SO_4^{2-} concentration in the nutrient solution[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(6): 1 135-1 145.

[6] 廖建良,何坤锡,郭友明. 营养液中添加低浓度氯化钠对大白菜生长的影响[J]. 北方园艺, 2018,(16): 70-75.

LIAO J L, HE K X, GUO Y M. Effects of low concentration sodium chloride on growth of *Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*(Lour)olsson in nutrient solution[J]. *Northern Horticulture*, 2018,(16): 70-75.

[7] 孟 闯,薛占军,杨继龙,等. 设施调温模式下叶施低浓度 NaCl 对黄瓜幼苗生长和生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2021,**32**(1): 222-230.

MENG C, XUE Z J, YANG J L, *et al.* Effects of foliar spraying with low concentration NaCl on the growth and physiological responses of cucumber seedlings under temperature regulation in solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,**32**(1): 222-230.

[8] 郑 洁,胡美君,郭延平. 光质对植物光合作用的调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008,**19**(7): 1 619-1 624.

ZHENG J, HU M J, GUO Y P. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008,**19**(7): 1 619-1 624.

[9] 付卫民. 有色膜覆盖对心里美萝卜生理特性及品质的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2012.

[10] 彭晓丹,杨再强,苏天星,等. 不同色膜的温光效应及其对温室甜椒产量和外观品质的影响[J]. 中国农业气象, 2013, **34**(2): 153-161.

PENG X D, YANG Z Q, SU T X, *et al.* Accumulated photo-thermal effectiveness of different colored plastic film and the effect on yield and exterior quality of sweet pepper[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, **34**(2): 153-161.

[11] 原 程,庄志群,杨凤娟,等. 有色膜对茄子幼苗品质的影响[J]. 西北农业学报, 2014,**23**(3): 159-163.

YUAN C, ZHUANG Z Q, YANG F J, *et al.* Effects of colored films on quality of eggplant seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014,**23**(3): 159-163.

[12] MIAO L X, ZHANG Y C, YANG X F, *et al.* Colored light-quality selective plastic films affect anthocyanin content, enzyme activities, and the expression of flavonoid genes in strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) fruit[J]. *Food Chemistry*, 2016,**207**: 93-100.

[13] 陈晓丽,张 馨,杨子强,等. 有色膜覆盖对紫苏生长及叶片矿质含量的影响[J]. 中国农业气象, 2018, **39**(2): 100-107.

CHEN X L, ZHANG X, YANG Z Q, *et al.* Effects of colored films on the growth and leaf mineral content of *Perilla frutescens*[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, **39**(2): 100-107.

[14] HE B, CHEN Y, ZHANG H, *et al.* The effect of colored plastic films on the photosynthetic characteristics and content of active ingredients of *Dysosma versipellis* [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2018, **59**(4): 519-528.

[15] 许大全,高 伟,阮 军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015,**51**(8): 1 217-1 234.

XU D Q, GAO W, RUAN J. Effects of light quality on plant growth and development [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015,**51**(8): 1 217-1 234.

[16] 西北农业大学植物生理生化教研组. 植物生理学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987.

[17] 季延海,于平彬,武占会,等. 低浓度 NaCl 对水培韭菜生长、产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015,**23**(5): 628-633.

JI Y H, YU P B, WU Z H, *et al.* Influence of low NaCl concentration on growth, quality and yield of Chinese chive in hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015,**23**(5): 628-633.

[18] 周熠玮,吴冠雄,肖 承,等. 低浓度 NaCl 对荞麦芽苗菜生长和品质的影响[J]. 蔬菜, 2016,(7): 6-7.

ZHOU Y W, WU G X, XIAO C, *et al.* Effects of low concentration NaCl on the growth and quality of buckwheat malt sprouts [J]. *Vegetables*, 2016,(7): 6-7.

[19] 王宝增,王腾蛟,王桂香. 低浓度 NaCl 对高粱生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2010,**38**(29): 16 169-16 170.

WANG B Z, WANG T J, WANG G X. Effect of NaCl at low concentration on growth of *Sorghum*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010,**38**(29): 16 169-16 170.

[20] 苏天星,杨再强,黄海静,等. 不同光质对温室甜椒气孔导度的影响[J]. 干旱气象, 2010,**28**(4): 443-448.

SU T X, YANG Z Q, HUANG H J, *et al.* Effect of light quality on stomatal conductance of sweet pepper in greenhouse[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, **28**(4): 443-448.

[21] 刘寿东,杨再强,苏天星,等. 不同光质对温室甜椒光合特性的影响[J]. 大气科学学报, 2010,**33**(5): 600-605.

LIU S D, YANG Z Q, SU T X, *et al.* Effect of light quality on the photosynthetic characteristics of greenhouse sweet pepper[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010,**33**(5): 600-605.

[22] 徐 凯,郭延平,张上隆,等. 不同光质膜对草莓果实品质的影响[J]. 园艺学报, 2007,**34**(3): 585-590.

XU K, GUO Y P, ZHANG S L, *et al.* Effect of light quality on the fruit quality of ‘toyonoka’ strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, **34** (3): 585-590.

[23] FRANQUERA E. Leaf morphological characteristics of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by different colored plastic mulch [J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2015, **3**(1): 20-25.

[24] FRANQUERA E N, MABESA R C, ESPINO R. Morpho-anatomical responses of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown with different colored plastic mulch [J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2015, **3**(1): 20-25.

[25] LI S M, RAJAPAKSE N C, YOUNG R E, *et al.* Growth responses of *Chrysanthemum* and bell pepper transplants to photosensitive plastic films [J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, **84**(3-4): 215-225.

[26] YE S Y, SHAO Q S, XU M J, *et al.* Effects of light quality on morphology, enzyme activities, and bioactive compound contents in *Anoectochilus roxburghii* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 857.

[27] 王瑞楠, 薛占军, 高 露, 等. 叶用莴苣全株营养累积分配的光谱效应[J]. 园艺学报, 2017, **44**(5): 963-971.

WANG R N, XUE Z J, GAO L, *et al.* Spectral effect for nutrient accumulation and distribution of whole lettuce plant [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, **44**(5): 963-971.

[28] WANG S, WANG X D, SHI X B, *et al.* Red and blue lights significantly affect photosynthetic properties and ultrastructure of mesophyll cells in senescing grape leaves [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2016, **2**(2): 82-90.

[29] HOGEWONING S W, TROUWBORST G, MALJAARS H, *et al.* Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, **61** (11): 3 107-3 117.

[30] SAVVIDES A, FANOURAKIS D, VAN IEPEREN W. Co-ordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **63**(3): 1 135-1 143.

[31] HERNÁNDEZ R, KUBOTA C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, **121**: 66-74.

[32] 杨再强, 张继波, 李永秀, 等. 红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响 [J]. 生态学报, 2012, **32**(8): 2 498-2 505.

YANG Z Q, ZHANG J B, LI Y X, *et al.* Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut *Chrysanthemum* flower [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(8): 2 498-2 505.

[33] KUREPIN L V, WALTON L J, REID D M. Interaction of red to far red light ratio and ethylene in regulating stem elongation of *Helianthus annuus* [J]. *Plant Growth Regulation*, 2007, **51**(1): 53-61.

[34] BIAN Z H, CHENG R F, YANG Q C, *et al.* Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2016, **141** (2): 186-195.

[35] MENG Q W, KELLY N, RUNKLE E S. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **162**: 383-391.

[36] XU K, GUO Y P, ZHANG S L, *et al.* Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2004, **3** (9): 40-48.

[37] 龙家焕, 浦 敏, 黄志午, 等. 光谱调控植物生长发育的研究进展 [J]. 照明工程学报, 2018, **29**(4): 8-16.

LONG J H, PU M, HUANG Z W, *et al.* Research progress of spectral regulation of plant growth and development [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2018, **29** (4): 8-16.

(编辑:裴阿卫)