网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.010

盐氮交互作用下温室白菜光合生理与产量的响应特征

周敏姑[1],董勤各[2],任士雄[2],张宏基[2]

(1 西北农林科技大学 旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;2 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】探讨盐氮交互作用下温室大棚白菜光合生理的响应特征,为温室盐渍土白菜高效施肥管理决策及提高白菜产量提供理论依据。【方法】采用温室盆栽试验,设置土壤含盐量(NaCl)和施氮量(N)2个因素,含盐量和施氮量分别设置4个水平,即S0(0 g/kg,非盐)、S1(2 g/kg,低盐)、S2(4 g/kg,中盐)、S3(5 g/kg,高盐)和N0(0 g/kg,无氮)、N1(0.05 g/kg,低氮)、N2(0.10 g/kg,中氮)、N3(0.15 g/kg,高氮),通过双因素交互试验设计,分析16组盐氮交互作用组合对白菜光合生理特性、叶绿素荧光特性参数、土壤理化性质及单株产量的影响。【结果】施氮可以显著提高土壤全氮和有机质含量,尤其是在高盐胁迫下,施氮处理显著促进了土壤有机质的积累,其中高盐高氮(S3N3)处理的土壤有机质含量为21.15 g/kg,较S3N0处理显著提高了51.3%。土壤全氮含量在S0N3下达到最高,为1.14 g/kg,较S0N0处理增加了32.6%。在低盐胁迫下,适量施氮能显著提高土壤中的硝态氮和铵态氮含量,而在高盐胁迫下,土壤中硝态氮的积累更为明显。S1N1处理白菜的净光合速率最高,为14.21 μmol/(m²·s),较S1N0处理显著提高19.20%。高盐高氮(S3N3)处理则显著抑制了温室白菜的光合作用,其净光合速率降至最低值,为3.52 μmol/(m²·s)。低中盐胁迫条件下,随施氮量增加白菜叶片净光合速率的下降主要表现为气孔限制;高盐胁迫处理下,随施氮量增加净光合速率的下降表现为非气孔限制。盐胁迫增强了白菜光系统Ⅱ反应中心的损伤,最大光化学效率在S3N3处理下降至0.43,显示出对光合作用的极度抑制,低盐胁迫和适宜施氮量对白菜叶片的光合结构有激发促进作用,中盐或高盐胁迫下各荧光参数值均有所降低,说明中盐、高盐胁迫下白菜PSⅡ光系统遭到破坏。白菜单株产量随盐胁迫的增强和施氮量增大呈先升后降趋势,S1N1、S1N2和S2N2处理单株产量显著增加,分别较S0N0处理提高了432.24%,357.36%和376.75%,但高盐胁迫下,过量施用氮肥会导致白菜产量显著下降,S3N3处理白菜的单株产量仅为76.90 g。【结论】在土壤低盐胁迫(2 g/kg NaCl)条件下,低氮(0.05 g/kg N)策略是实现盐碱土温室白菜节肥高产的最优选择。

[关键词] 白菜;盐胁迫;温室;光合特性;施肥策略

[中图分类号] S642.206 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0091-11

Responses of photosynthetic physiology and yield of Chinese cabbage to salt and nitrogen interaction under greenhouse conditions

ZHOU Mingu[1],DONG Qinge[2],REN Shixiong[2],ZHANG Hongji[2]

(1 *Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Area of China (IWSA),Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi* 712100, *China*;2 *College of Soil and Water Conservation Science and Engineering,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi* 712100,*China*)

[收稿日期] 2025-07-11 [修回日期] 2025-10-28

[基金项目] 国家重点研发计划项目子课题"设施果菜类蔬菜温光水肥环境综合智能调控关键技术研发与示范"(2024YFD2300704)

[作者简介] 周敏姑(1973—),女,陕西咸阳人,高级实验师,主要从事X射线衍射技术及其在农业资源高效利用与改良领域的应用研究。E-mail:zming@163.com

[通信作者] 董勤各(1982—),男,河南南阳人,副研究员,主要从事节水灌溉方法与技术研究。E-mail:qgdong@163.com

Abstract:【Objective】This study aims to explore the responses of photosynthetic physiology of greenhouse-grown Chinese cabbage to salt-nitrogen interaction, thus providing a theoretical basis for optimizing fertilization management and enhancing yield in greenhouse saline soils.【Method】A greenhouse pot experiment was conducted, adopting a two-factor design of soil salinity (NaCl) and nitrogen (N) application rate. Each factor was set at four levels, namely S0 (0 g/kg, no salt), S1 (2 g/kg, low salt), S2 (4 g/kg, medium salt), and S3 (5 g/kg, high salt) for salinity; and N0 (0 g/kg, no nitrogen), N1 (0.05 g/kg, low nitrogen), N2 (0.10 g/kg, medium nitrogen), and N3 (0.15 g/kg, high nitrogen) for nitrogen. The effects of 16 groups of salt-nitrogen interaction on the photosynthetic physiological characteristics, chlorophyll fluorescence parameters, soil physicochemical properties, and yield per plant of Chinese cabbage were analyzed by the two factor interaction design.【Result】Nitrogen application significantly increased soil total nitrogen and organic matter contents. This effect was particularly pronounced under high salt stress, where nitrogen application significantly promoted soil organic matter accumulation. The soil organic matter content in the S3N3 treatment was 21.15 g/kg, which was 51.3% higher than that in the S3N0 treatment. The soil total nitrogen content reached the highest at S0N3, measuring 1.14 g/kg, which represented a 32.6% increase compared with S0N0. Under low salt stress, moderate nitrogen application significantly increased soil nitrate and ammonium nitrogen contents, whereas high salt stress led to more pronounced accumulation of nitrate nitrogen. The net photosynthetic rate peaked at 14.21 μmol/(m^2·s) in the S1N1 treatment, which was 19.20% higher than that in S1N0 treatment. In contrast, the high salt stress and high nitrogen (S3N3) treatment significantly inhibited photosynthesis, resulting in the lowest net photosynthetic rate of 3.52 μmol/(m^2·s). The decrease of in net photosynthetic rate with increasing nitrogen under low to medium salt stress was mainly due to stomatal limitation, while it shifted to non-stomatal limitation under high salt stress. Salt stress enhanced the damage of photosystem Ⅱ reaction centers of Chinese cabbage. The maximum photochemical efficiency decreased to 0.43 in S3N3 treatment, indicating the extreme inhibition of photosynthesis. While low salt stress combined with appropriate nitrogen stimulated the photosynthetic structure, all chlorophyll fluorescence parameters decreased under medium or high salt stress, indicating that the photosystem of Chinese cabbage was damaged under medium salt and high salt stress. The yield per plant of Chinese cabbage increased first and then decreased with increasing salt stress and nitrogen application. The yield per plant of S1N1, S1N2 and S2N2 treatments increased significantly by 432.24%, 357.36% and 376.75% compared with S0S0, respectively. However, under high salt stress, excessive nitrogen application significantly reduced the yield of Chinese cabbage, with the S3N3 treatment yielding only 76.90 g per plant.【Conclusion】Under low soil salinity stress (2 g/kg NaCl), a low nitrogen application (0.05 g/kg N) strategy is the optimal choice for achieving high yield and fertilizer use efficiency in greenhouse Chinese cabbage cultivation in saline-alkali soils.

Key words: Chinese cabbage; salt stress; greenhouse; photosynthetic characteristics; fertilization strategy

我国盐碱地面积超过1 000万hm^2,占世界盐碱地总面积的10%以上,且以0.5%的速率逐年增加[1]。白菜是我国居民日常生活中最重要的蔬菜之一,富含大量的维生素和钙等有益物质且易于储存,是我国居民冬春季最常见的食材[2]。土壤次生盐渍化和不合理施肥会影响白菜的生长和产量,限制了盐碱地白菜的种植规模和收益,影响了盐碱地区域蔬菜产业的可持续发展。

盐胁迫是影响作物生长发育和产量的主要非生物胁迫之一,诸多学者围绕耐盐模式下蔬菜作物的盐胁迫生理生长进行了大量研究。盐分过高会破坏作物的离子稳态与膜结构,从而影响渗透调节、水分吸收、代谢和光合作用,导致生长受阻、品质下降,严重时甚至会导致蔬菜死亡[3]。辛悦等[4]在盐胁迫梯度培养互花米草的研究中发现,当盐含量高于40 g/kg时其光合作用受到抑制。赵杏花等[5]研究发现,当盐含量高于或等于0.16 g/kg时,唐古特白刺生长受抑甚至死亡。氮素可以在作物受到盐碱胁迫时为其提供自身生长发育所必需的营养元素。张珺橦等[6]研究发现,当盐含量较小时,适量增施氮肥可较大幅度提高作物产量,最高可较不施氮肥提高105.36%。刘新宇等[7]研究发现,当

盐含量较高时，随着氮肥施用量的增加，作物的净光合速率、PSⅡ最大光化学量子产量（F_v/F_m）、PSⅡ实际光化学量子产量（$\varphi_{PSⅡ}$）逐渐增大。TIAN 等[8]通过盆栽试验研究发现，施用适量的氮肥可以促进盐胁迫下油菜幼苗的生长发育，维持其渗透平衡并促进光合作用。但是过量施用氮肥会导致氮素在作物体内的过度积累，进而引起碳氮代谢失调，使植物叶片萎蔫，进而降低光合速率[9]。目前，有关白菜的研究主要集中在单一盐胁迫或施肥量对其生理特性的影响，关于盐氮交互作用对温室白菜光合生理响应特性及产量关系的研究却鲜有报道。

本研究基于温室白菜盆栽试验，设置不同水平施氮和盐胁迫处理，探究白菜叶片光合生理、荧光特性及土壤理化性质的变化，以及盐氮交互作用对白菜单株产量的影响，以期明确不同土壤含盐量下适合温室白菜种植的合理施氮量范围，进而为盐碱地白菜种植提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　盆栽试验概况

本试验于 2022 年 1－3 月在西北农林科技大学南校区科研温室进行，供试土壤为陕西杨陵垆土，供试白菜品种为“秦杂 2 号”。采用口径 24 cm、底径 19.5 cm、高 26 cm 的塑料盆开展盐氮交互作用下的白菜盆栽试验。

1.2　试验设计

试验设置含盐量（NaCl）和施氮量 2 个因素，其中土壤含盐量设置 S0（0 g/kg）、S1（2 g/kg）、S2（4 g/kg）、S3（5 g/kg）4 个水平，分别对应非盐、低盐、中盐和高盐 4 种盐胁迫条件；施氮量设置 N0（0 g/kg）、N1（0.05 g/kg）、N2（0.10 g/kg）、N3（0.15 g/kg）4 个水平，分别对应无氮、低氮、中氮和高氮 4 个施氮处理，共 16 个盐氮处理组合，每处理 3 盆，每盆 3 株苗，每组设 3 个重复，其中 S0N0 为对照（CK）。供试土壤风干过 2 mm 筛备用。装盆前将所需的 NaCl 和肥料于土壤中搅拌均匀，其中氮源采用尿素（含氮 46.4%）和磷酸二铵（含氮 16.0%，含磷 44.0%）。根据土壤氮含量梯度处理的需要，按比例折算为尿素和磷酸二铵所需的质量，确保每个处理组的氮量达到预定目标。

各盆装土 10 kg，盆底加入石砾等填充物辅助排水。白菜播种后表面覆土，喷洒蒸馏水至土壤含水量为田间持水量的 70%，之后将花盆置于温室内。温室侧墙保温帘全部打开，开启补光灯，维持温室温度在 20 ℃左右。

1.3　测量指标与方法

1.3.1　*土壤有机质、全氮与硝态氮、铵态氮*　分别在播种后的第 15，45 和 75 天，对应白菜的发芽期、莲座期和结球期采集土样，取土深度为 0～10 cm。采用连续流动分析仪测定 3 次取样的土壤硝态氮、铵态氮和第 75 天土样的土壤全氮含量，用重铬酸钾外加热法[10]测定第 75 天土样的土壤有机质。

1.3.2　*叶绿素含量*　分别在白菜发芽期、莲座期和结球期，每株白菜选定 3 个叶片，采用 Apogee MC-100 叶绿素仪测定每个叶片的叶绿素含量，结果取平均值。

1.3.3　*光合生理参数*　在白菜结球期，于晴天条件下每株白菜选 3 个叶片测定光合特性。利用便携式植物光合仪 LI-6800，采用荧光光源，设定光合有效辐射（PAR）为 1 200 μmol/（m^2·s），空气 CO_2 浓度（C_a）为 400 μmol/mol，测定净光合速率（P_n）、气孔限定值（L_s）、胞间 CO_2 浓度（C_i）和气孔导度（G_s）等指标。同时用便携式植物光合仪 LI-6800，测定初始荧光（F_0）、最大荧光（F_m）、光下实际荧光（F_s）和光下最大荧光（F_m'）。根据所测数据计算 PSⅡ最大光化学量子产量（F_v/F_m）、PSⅡ有效光化学量子产量（F_v'/F_m'）、PSⅡ实际光化学量子产量（$\varphi_{PSⅡ}$）、表观光合电子传递效率（ETR）和光化学猝灭系数（q^P）。每个处理重复测定 3 次，结果取平均值。

1.3.4　*产量*　播种后 75 d 收获，每处理随机选择 3 株白菜，将白菜按叶片分解装袋，于烘箱 105 ℃杀青 30 min 后，再于 75 ℃烘干至质量恒定，分别测定单株干质量，结果取平均值。

1.4　数据处理与统计

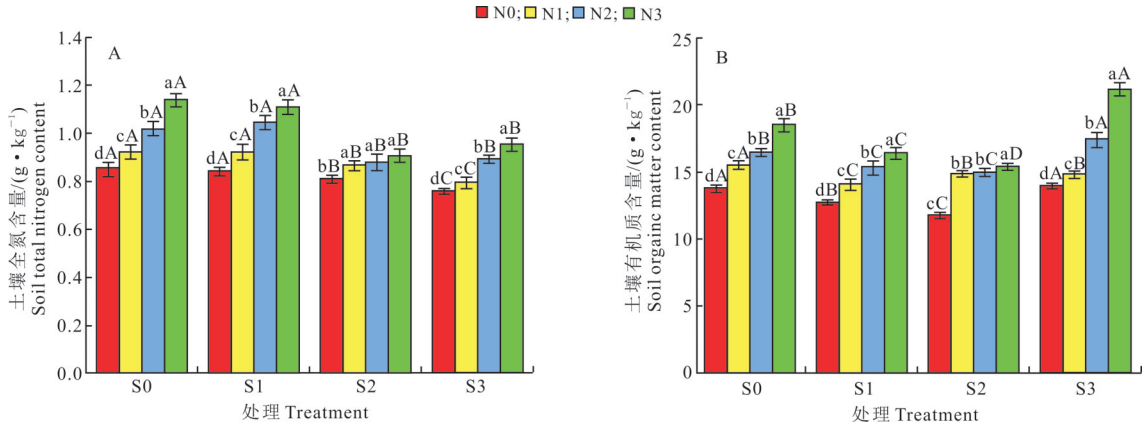
试验数据采用 Excel 进行处理，应用 SPSS 26.0 对不同含盐量及不同施氮量下的土壤理化性质、白菜的光合特性等数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），用 Duncan 多重比较（$\alpha=0.05$）进行显著性检验，利用 Origin 2021 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　盐氮交互作用对土壤有机质和全氮含量的影响

2.1.1　*土壤全氮（TN）含量*　图 1-A 显示，总体而言，施氮是提升土壤 TN 含量的主要措施。在相同盐胁迫水平下，土壤 TN 含量均随施氮量的增加而

显著升高。S0N3处理的土壤TN含量达到最高值(1.14 g/kg),较S0N0处理显著提高32.6%。盐胁迫对土壤TN含量的影响则呈现非线性特征,且受施氮水平的调控。在无氮条件下,土壤TN含量随盐胁迫水平提升而单调下降,与S0相比,S1~S3处理的降幅为1.79%~11.41%。但在高氮条件下,S0和S1处理的土壤TN含量较高,与其相比S2和S3处理显著降低,但在高盐条件下有所回升。



S0、S1、S2和S3分别代表土壤含盐量为0,2,4和5 g/kg的非盐、低盐、中盐和高盐胁迫;N0、N1、N2和N3分别代表施氮量0,0.05,0.10和0.15 g/kg的无氮、低氮、中氮和高氮施肥。图柱上标不同小写字母表示相同盐胁迫下不同施氮量间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同施氮量下不同盐胁迫处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

S0, S1, S2, and S3 represent no salt, low salt, medium salt and high salt stress with soil salt content of 0, 2, 4 and 5 g/kg, respectively. N0, N1, N2, and N3 represent no nitrogen, low nitrogen, medium nitrogen, and high nitrogen fertilization with application rates of 0, 0.05, 0.10, and 0.15 g/kg, respectively. Different lowercase letters on the bars indicate significant differences among nitrogen application rates under the same salt stress ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among salt stress treatments under the same nitrogen application rate ($P<0.05$). The same below.

图1 不同水平盐胁迫和施氮条件下土壤全氮和有机质含量的变化

Fig. 1 Variations of soil total nitrogen and organic matter content under different levels of salt and nitrogen application

2.1.2 土壤有机质(SOM)含量 由图1-B可知,在所有盐胁迫条件下,SOM含量几乎均随施氮量的增大而显著提高。在非盐胁迫时,SOM含量从S0N0到S0N3处理的增幅为34.18%。施氮对土壤有机质含量的促进效应在高盐胁迫下被放大,SOM含量在S3N3处理下为21.15 g/kg,较S3N0的增幅为51.3%,为所有处理中的最高值。盐胁迫对SOM的影响同样表现复杂。在中、低氮条件下,SOM含量在低、中盐胁迫下普遍低于非盐胁迫处理。但在高盐胁迫下,无论施氮与否SOM含量均显著高于低、中盐胁迫处理。

2.2 盐氮交互作用对温室白菜土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量的影响

不同水平盐胁迫和施氮条件下土壤的铵态氮、硝态氮含量随白菜生长时期的变化如图2所示。由图2-A可知,在白菜发芽期,中、高氮较低氮处理显著增加了土壤的NO_3^--N含量,尤其在高盐胁迫下,N3处理土壤的NO_3^--N含量高达261.10 mg/kg,为该生育期的最高值。盐对土壤NO_3^--N含量的影响呈现非线性特征,在无氮条件下,低盐、中盐胁迫显著降低了土壤的NO_3^--N含量,其中S2N0处理土壤的NO_3^--N含量为69.91 mg/kg,是该生育期的最低值,但在高盐胁迫下,土壤NO_3^--N含量有所回升。NH_4^+-N含量总体上随施氮量和盐胁迫强度的增加而升高(图2-B),其中S3N3处理土壤的NH_4^+-N含量最高,为26.16 mg/kg,而S1N0处理的含量最低,为8.20 mg/kg。

图2-C显示,在白菜莲座期,在非盐和低盐胁迫下,中、高氮处理较低氮处理显著增加了土壤的NO_3^--N含量。而在中盐和高盐胁迫下,施氮的增效作用明显减弱甚至逆转,S2N1处理土壤的NO_3^--N含量(55.68 mg/kg)显著高于S2N2处理(37.17 mg/kg),S3N0处理土壤的NO_3^--N含量(89.61 mg/kg)显著高于其他处理,为同时期所有处理的最高值。图2-D表明,各处理土壤的NH_4^+-N含量整体呈现下降趋势,且响应模式复杂。在中盐、高盐胁迫下表现出不规则波动,其中S2N0和S3N1处理土壤的NH_4^+-N含量均处于该时期较高水平。

由图2-E可知,与发芽期和莲座期相比,到了白菜结球期,大部分处理土壤的NO_3^--N含量进一步降低。而在高盐胁迫下,土壤NO_3^--N含量随施氮量的增加而显著升高,其中S3N3处理的NO_3^--N含量升

高至 113.66 mg/kg。但是在非盐和低盐胁迫条件下，NO_3^--N 含量普遍处于较低水平，S1N0 处理土壤的 NO_3^--N 含量（14.64 mg/kg）为全生育期的最低值，这表明在白菜生长后期，高盐与高氮组合可以促进土壤 NO_3^--N 的积累。图 2-F 显示，在非盐和低盐胁迫下，随施氮量增加，土壤 NH_4^+-N 整体呈降低趋势，其中以 S0N3 处理最低，仅为 4.87 mg/kg。同一施氮水平下，S2 和 S3 处理土壤的 NH_4^+-N 含量显著高于 S0 和 S1 处理（S2N3 除外）。特别是在高盐胁迫下，各施氮处理的 NH_4^+-N 含量均维持在 7.96～8.14 mg/kg 的高位。

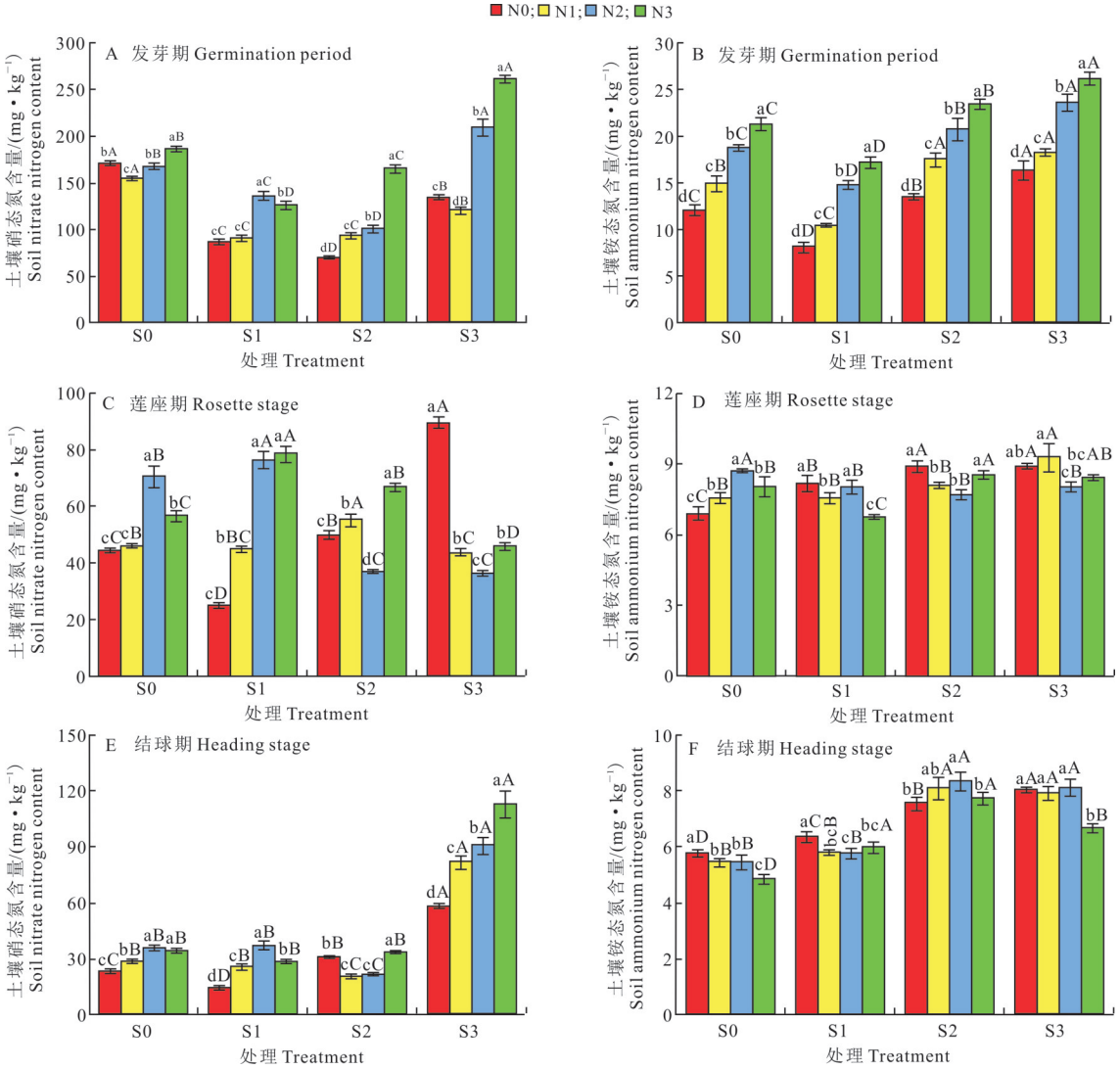


图 2　不同含盐量和施肥量处理下土壤铵态氮含量、硝态氮含量随白菜生长时期的变化

Fig. 2　Variations of soil ammonium and nitrate nitrogen content during the growth of Chinese cabbage under different salinity and nitrogen application treatments

2.3　盐氮交互作用对温室白菜叶片光合特性的影响

在白菜结球期，不同处理组合白菜叶片光合特性指标的测定结果如图 3 所示。

2.3.1　净光合速率（P_n）　由图 3-A 可知，在白菜结球期，同一盐分胁迫水平下白菜叶片的净光合速率 P_n 随施氮量的增加表现出先增后降的趋势。在 S0～S3 盐胁迫水平下，低氮处理白菜叶片的 P_n 值均为最高，较不施氮处理提高 5.8%～19.6%，而中、高氮处理则显著抑制了光合作用。在低盐胁迫下，S1N1 处理的 P_n 值达到了整个试验的最高值 14.21 μmol/(m²·s)。随着盐胁迫程度的进一步增大，P_n 开始显著下降，S2N1 和 S3N1 处理的 P_n 值分别降至 10.23 和 9.31 μmol/(m²·s)。在中、高氮水平下，P_n 总体上随盐度升高而单调下降。其中在 N3 水平下，P_n 值从 S0 的 5.49 μmol/(m²·s) 持续下降至 S3 的 3.52 μmol/(m²·s)，S3N3 处理白菜叶片的 P_n 值为所有处理中的最低值，仅为 S1N1 处理的 24.8%。

2.3.2 气孔导度(G_s) 由图3-B可知,白菜叶片G_s的变化趋势与P_n高度一致。在各盐分胁迫水平下,G_s几乎均在N1处理时达到峰值,之后随施氮量增加而显著下降。在低盐胁迫下,G_s从N0的0.26 mol/(m²·s)上升至N1的0.29 mol/(m²·s),随后在N3处理时下降至0.14 mol/(m²·s)。同时,与低盐处理相比,G_s随盐度增加而显著降低,S3水平下的G_s值普遍最低。

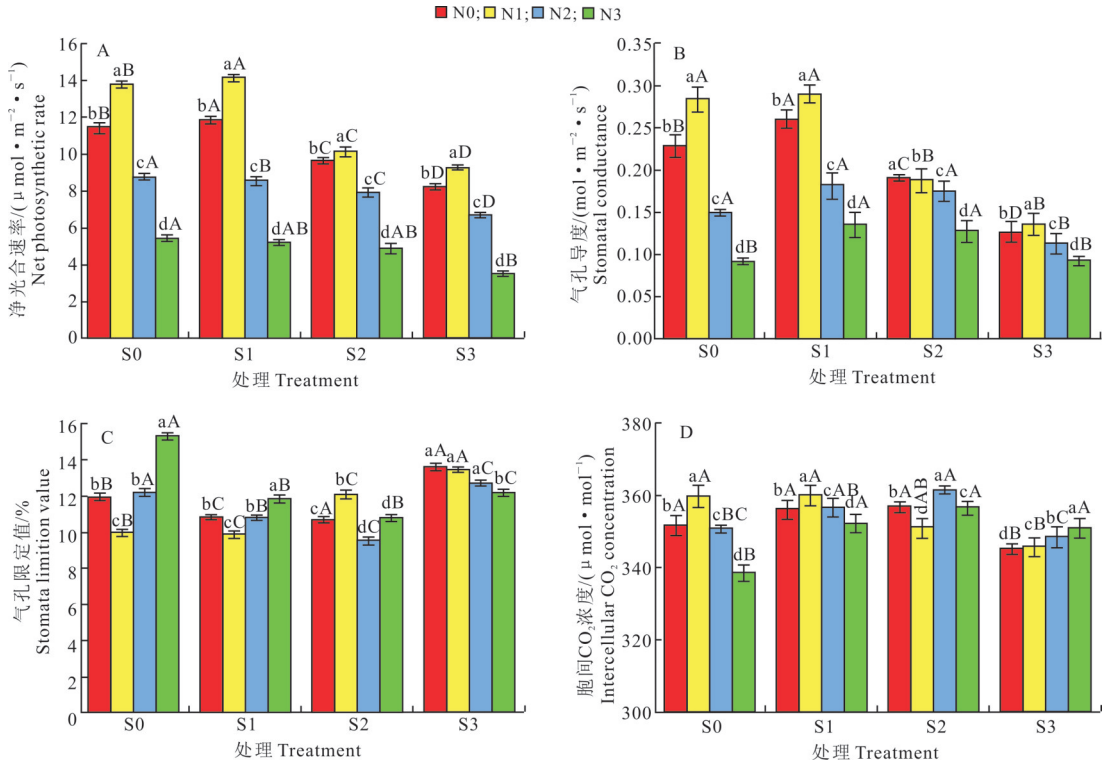


图3 盐氮交互作用对白菜叶片光合特性的影响

Fig. 3 Effects of salt-nitrogen interaction on the photosynthetic characteristics of Chinese cabbage leaves

2.3.3 气孔限定值(L_s) 植物叶片的L_s可以反映气孔因素对其光合作用的限制程度。由图3-C可知,在无盐和低盐胁迫水平下,白菜叶片的L_s随施氮量增加而呈升高趋势,且无盐和低盐胁迫水平下N3较N1的增幅分别为50.33%和19.84%。其表现与G_s的下降趋势相反,再次证实了在高氮条件下,气孔限制是导致P_n下降的主要原因。

2.3.4 胞间CO_2浓度(C_i) 图3-D显示,盐氮交互作用下白菜叶片C_i的变化趋势更为复杂,在S0和S1水平下,C_i随施氮量增加而下降,与G_s和P_n的变化趋势基本一致。但在中、高盐胁迫下,当施氮量从N1增加至N3时,P_n和G_s均有所下降,但C_i却表现为持平甚至上升,其中S3处理下C_i值从346.14升至351.17 μmol/mol。

2.4 盐氮交互作用对温室白菜叶绿素和荧光参数的影响

2.4.1 叶绿素含量 盐氮交互作用处理下,不同生育期白菜叶片叶绿素含量的变化如图4所示。图4-A显示,在白菜发芽期,在无氮条件下,随盐胁迫程度增大,白菜叶片的叶绿素含量从非盐胁迫的255.37 μmol/m²急剧下降至高盐胁迫(S3)下的116.57 μmol/m²,降幅高达54.4%。施氮能有效缓解盐胁迫的负面影响,在低盐胁迫水平下,N1和N2处理的叶绿素含量较N0处理均显著提高了48%。但在非盐胁迫(S0)下,施氮呈现出抑制效应,叶绿素含量随施氮量增加而下降。此外,S3N3处理的叶绿素含量为82.15 μmol/m²,为整个试验的最低值。由图4-B可知,在白菜莲座期,施氮对盐胁迫的缓解作用更为明确且一致。在低盐、中盐和高盐胁迫处理下,低、中氮处理白菜叶片的叶绿素含量均显著高于不施氮处理。S1N2处理的叶绿素含量为237.80 μmol/m²,较S1N0处理的155.37 μmol/m²显著提高了53.1%。在中、高盐胁迫下,S2N1和S3N2处理的叶绿素含量分别达到最高,较不施氮处理的增幅分别为32.9%和36.5%。在白菜结球期(图4-C),盐氮交互作用对叶绿素的影响表现得较为复杂。首先,叶绿素的绝对含量普遍大幅高于前两个时期。其次,在中盐、高盐胁迫与低氮的处

理组合中,其叶绿素含量超越了所有非盐和低盐胁迫处理。其中,S2N1处理的叶绿素含量达到了整个试验的峰值,为470.20 μmol/m^2,该值较非盐胁迫下的最优处理S0N1的366.10 μmol/m^{2}高出28.4%。同样,在高盐胁迫下,S3N2处理的叶绿素含量也高达420.87 μmol/m^2,显著高于S0和S1水平下的所有处理。

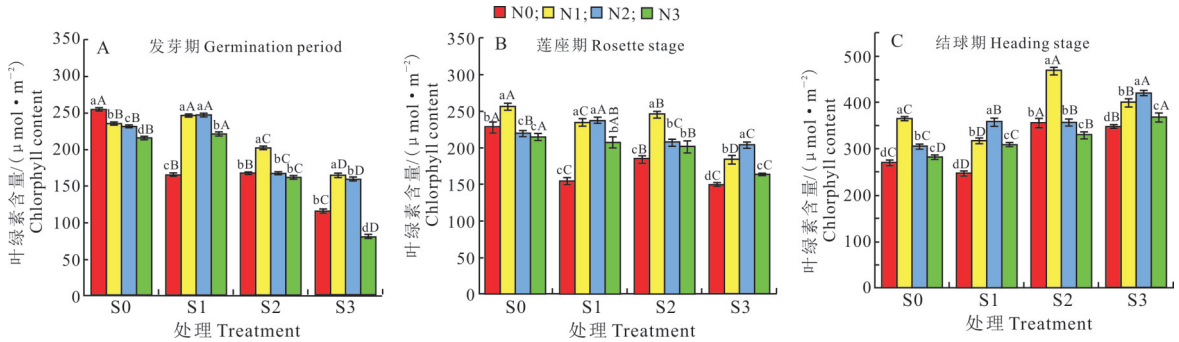


图4　盐氮交互作用对不同生育期白菜叶绿素含量的影响

Fig. 4　Effects of salt-nitrogen interaction on chlorophyll content of Chinese cabbage leaves at different growth stages

2.4.2　*初始荧光(F_0)*　图5-A显示,中盐胁迫白菜叶片的F_0值显著高于非盐、低盐和高盐胁迫处理。在中盐胁迫下,F_0随施氮量增加而显著升高,在S2N3处理下达到整个试验的最高值,较对照组S0N0显著增加了66.5%。相比之下,在非盐和高盐胁迫下,F_0对施氮的响应则表现为先升后降或持续下降。如在S3水平下,F_0值从N0的805.38显著下降至N3的554.29,降幅达31.2%。

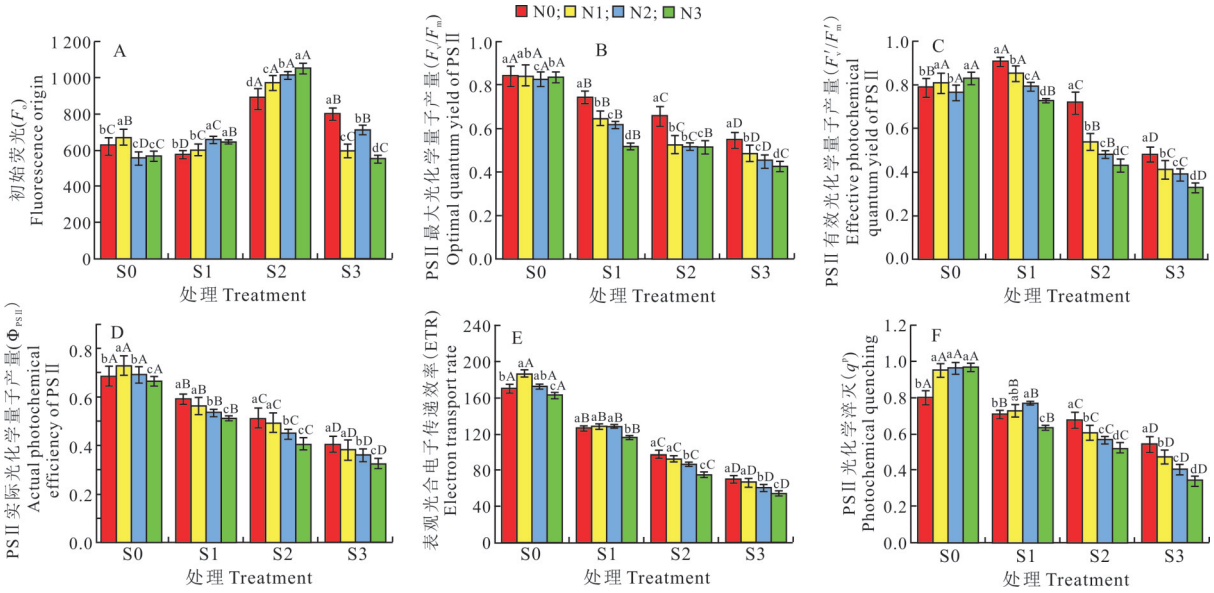


图5　盐氮交互作用对白菜叶片荧光参数的影响

Fig. 5　Effects of salt-nitrogen interaction on chlorophyll fluorescence parameters of Chinese cabbage leaves

2.4.3　*F_v/F_m和F_v'/F_m'*　由图5-B可知,相同施氮处理下,随着盐胁迫增大F_v/F_m整体呈现显著下降的趋势。在非盐胁迫下,各施氮处理的F_v/F_m值均维持在0.83以上。随着盐胁迫的加剧,F_v/F_m值急剧下降,在高盐胁迫下,所有处理的F_v/F_m值均低于0.55,其中S3N3处理的F_v/F_m值最低,仅为0.43,较S0N0处理下降了49.4%。在不同盐胁迫条件下,F_v/F_m均随施氮量的增加而显著降低,N1、N2和N3处理的F_v/F_m较无氮处理(N0)的降幅分别为12.99%~29.84%,19.99%~21.82%,11.80%~22.48%。图5-C显示,F_v'/F_m'变化趋势与F_v/F_m类似。在非盐和低盐胁迫条件下,F_v'/F_m'值大多维持在0.73以上。但随着盐胁迫程度加剧和施氮量增加F_v'/F_m'显著下降。在中盐胁迫下,F_v'/F_m'从N0的0.72降至N3的0.44,降幅达38.9%。在高盐胁迫下,该值进一步降低,S3N3处理的F_v'/F_m'值降为0.33,是全试验的最低值。

2.4.4　*$\varphi_{PSⅡ}$和ETR*　由图5-D、E可知,$\varphi_{PSⅡ}$和

ETR的变化趋势高度一致,在相同施氮量下,随着盐胁迫程度加剧,$\varphi_{PS\Ⅱ}$和ETR均呈显著下降趋势。在非盐胁迫下,$\varphi_{PS\Ⅱ}$和ETR均在N1处理时达到峰值,其中S0N1处理的$\varphi_{PS\Ⅱ}$和ETR分别为0.73和186.74,这与P_n在N1水平达到峰值的现象相吻合。在高盐胁迫和高氮组合下,S3N3处理的$\varphi_{PS\Ⅱ}$和ETR降至全试验最低值,分别为0.33和54.30,较S0N1处理分别下降了54.8%和70.9%。这表明高盐与高氮组合通过抑制白菜叶片PSⅡ的实际光化学活性和电子传递速率,最终导致白菜光合生产力的急剧下降。

2.4.5 光化学淬灭系数(q^P) 图5-F显示,在相同施氮量下,q^P值随盐胁迫程度加剧而显著下降。在非盐胁迫下,各施氮处理白菜叶片的q^P值均在0.80以上,其中N1、N2、N3处理的q^P值均高达0.96。在高盐胁迫下,q^P值随施氮量增加急剧降低。在S3水平下,q^P值从N0的0.55持续下降至S3的0.35,为全试验的最低值。

2.5 盐胁迫下施氮量对白菜产量的影响

由表1可以看出,施氮对白菜产量的影响显著大于盐胁迫的影响,且呈现出低氮、中氮促进产量,高氮抑制产量的非线性规律。在非盐和低盐胁迫下,N0处理的产量均为最低,其中S0N0处理白菜的单株干质量仅为52.60 g。在非盐胁迫下,产量随施氮量增加呈先升高后降低趋势,在N2处理时达到峰值,为203.33 g,较N0处理显著提高了286.6%;N3处理的产量则较N2处理显著下降了47.6%。在低盐胁迫下,产量在N1处理时达到整个试验的最高值,为279.43 g,较S1N0处理的83.97 g提高了232.8%。在中盐胁迫下,产量峰值出现在N2处理,为250.77 g。在非盐、低盐和中盐胁迫水平下,高氮处理的产量均显著低于低氮处理。整个试验的最高产量出现在S1N1处理,而最低产量出现在S0N0处理。在高盐胁迫下,各施氮处理的产量均处于较低水平且相互间无显著差异。整体而言,S1N1、S1N2和S2N2是产量较高的3种处理组合。

表1 盐氮交互作用下白菜单株产量的变化

Table 1 Changes of yield per plant of Chinese cabbage under the interaction of salt and nitrogen g

因素水平 Factor level	N0	N1	N2	N3
S0	52.60 dD	157.03 bC	203.33 aB	106.63 cB
S1	83.97 cC	279.43 aA	240.57 bA	235.07 bA
S2	168.37 cA	207.80 bB	250.77 aA	120.27 dB
S3	143.40 aB	76.07 bD	81.90 bC	76.90 bC

注:①S0、S1、S2和S3分别表示土壤含盐量为0,2,4和5 g/kg的非盐、低盐、中盐和高盐胁迫处理;N0、N1、N2和N3分别表示施氮量0,0.05,0.10和0.15 g/kg的无氮、低氮、中氮和高氮施肥处理。②表中各数据后小写字母表示相同盐胁迫下不同施氮量间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同施氮量下不同盐胁迫处理间差异显著($P<0.05$)。

Note:①S0, S1, S2 and S3 represent no salt, low salt, medium salt, and high salt stress with soil salt content of 0, 2, 4, and 5 g/kg, respectively. N0, N1, N2, and N3 represent no nitrogen, low nitrogen, medium nitrogen, and high nitrogen fertilization with application rates of 0, 0.05, 0.10, and 0.15 g/kg, respectively. ②Different lowercase letters after data in the table indicate significant differences among nitrogen application rates under the same salt stress ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among salt stress treatments under the same nitrogen application rate ($P<0.05$).

3 讨论与结论

3.1 盐氮交互作用对温室白菜土壤有机质和全氮含量的影响

本研究中,无论盐分胁迫与否,施氮均能显著提升土壤全氮和有机质含量,这与多数研究结论[10-12]一致。低盐、中盐胁迫下土壤有机质含量下降,可能是土壤盐分通过渗透胁迫和离子毒害抑制植物生长,减少了光合产物和残体输入[13]。在重盐胁迫水平下,随施氮量增加土壤有机质含量显著上升,可能是因为高盐分与高氮肥共同创造了极高的渗透压环境,抑制了土壤有机质的生物降解过程[14]。

3.2 盐氮交互作用对温室白菜土壤NO_3^--N和NH_4^+-N含量的影响

发芽期高氮和高盐胁迫下土壤NO_3^--N含量反常升高,可能是在此条件下,部分耐盐微生物仍保持一定活性,反硝化过程被抑制,从而导致NO_3^--N的暂时性积累[15]。在生育中后期的中盐和高盐胁迫下,土壤NH_4^+-N含量维持在相对较高水平,可能是因为硝化作用受阻,导致NH_4^+-N向NO_3^--N的转化速率减缓[16]。在白菜结球期,高盐胁迫与高氮水平下,土壤NO_3^--N和NH_4^+-N均表现出显著的高值,一方面可能是由于高氮处理提供了大量的氮源,另

一方面可能是高盐胁迫通过渗透胁迫和离子毒害严重抑制了白菜的生长,使其在生长后期基本丧失了吸收氮素的能力而导致土壤NO_3^--N和NH_4^+-N累积[17]。这与AKHTAR等[18]认为"高盐环境下氮转化过程受阻导致氮素累积"的结论一致。

3.3　盐氮交互作用对温室白菜光合特性的影响

本研究中,低盐低氮处理白菜叶片的净光合速率最高,这个现象可能是因为低氮处理恰好满足了白菜结球期的氮素需求,促进了光合色素和酶的合成,而未达到产生氮毒害作用的阈值[19],且低水平的逆境胁迫可以激活植物的防御和适应性调节机制[17],适量施氮能够通过增强渗透调节能力和抗氧化防御系统,有效缓解盐胁迫对植物的伤害[20]。本研究表明,这种缓解效应在低氮水平下表现最佳,与TIAN等[21]的研究结果一致。随着盐胁迫程度加剧和施氮量增加,白菜叶片净光合速率急剧下降,其内在机制涉及气孔限制。盐胁迫引起白菜根部渗透势降低,植物为减少蒸腾失水而主动关闭气孔,导致G_s下降[22]。同时,高量施用的氮肥本身即为盐类,会进一步增加土壤溶液的渗透势,促进气孔关闭[23]。非气孔限制在高盐高氮胁迫组合下作用更为凸显,这可能是因为白菜叶片本身光合能力受到损伤,尽管气孔部分关闭,但进入叶肉细胞的CO_2浓度仍然充足,而叶肉细胞却无法有效利用这些CO_2所致[22]。崔彦农等[24]关于低K^+条件下罗布麻对盐胁迫的光合响应机制研究也得到了相似的结果。

3.4　盐氮交互作用下白菜叶绿素含量和叶绿素荧光参数的响应特征

白菜叶绿素含量随盐胁迫增强而显著下降,可能是因为盐胁迫引发了渗透胁迫,破坏了叶绿体结构,进而抑制叶绿素合成[25]。适量施氮能够缓解盐胁迫对叶绿素合成的抑制,这与其他学者的研究结果[26-27]一致。高氮处理往往对盐胁迫的缓解效果不佳甚至会产生毒害作用,这可能是因为高浓度的氮肥本身会增加土壤溶液的盐浓度,并与盐胁迫产生叠加效应,进而加剧对白菜根系的渗透胁迫和离子毒害[23]。在白菜结球期,中盐、高盐胁迫与低氮和中氮组合处理白菜的叶绿素含量不降反增,可能是因为盐胁迫在抑制植物整体生物量积累的同时,对叶片面积扩张的抑制程度可能大于对叶绿素合成的抑制,导致在有限的叶面积内,叶绿素被浓缩,从而表现为单位面积叶绿素含量的升高[19]。

初始荧光F_0的升高通常被认为是PSⅡ反应中心受到损伤或失活的标志[28],中盐、高盐胁迫与高氮组合处理显著提升了温室白菜的F_0值,表明其对PSⅡ造成了严重破坏。F_v/F_m是反映PSⅡ潜在光合活性的关键指标,其下降是诊断光抑制的典型特征,且低于0.8则表明一定比例的PSⅡ反应中心被破坏或失活[29]。本研究中,$\varphi_{PS\Ⅱ}$和ETR与P_n均在低氮处理下达到峰值,且在高盐高氮交互作用下急剧下降,这表明P_n的降低直接源于光反应阶段光能捕获和电子传递效率的降低,这与XU等[30]在水稻上的研究结果一致。在高盐胁迫条件下q^P显著下降,说明盐胁迫降低了PSⅡ反应中心的活性,阻碍了叶片的光反应性能,减少了PSⅡ开放中心的数目,PSⅡ结构遭到伤害,而叶片可能通过热消散来淬灭叶绿素荧光,耗散过剩的激发能,缓解盐胁迫对光合作用的不利影响,这与唐玲等[31]在鸡爪槭上的研究结果相似。

3.5　盐氮交互作用对温室白菜产量的影响

本研究中,白菜产量的变化规律与结球期净光合速率P_n的变化趋势高度相近,证明了结球期的光合生产能力是决定最终产量的重要因素。过量施氮和高盐胁迫则通过气孔限制和非气孔限制双重途径严重抑制了P_n,导致碳同化能力急剧下降,最终表现为产量的大幅降低。在非盐和低盐胁迫下,产量与施氮量呈正相关,表明在这些条件下,植物能够有效地吸收和利用土壤中的矿质氮来合成生物量。在高盐胁迫下,尽管高氮处理的土壤中积累了全生育期最高水平的硝态氮,其产量却处于极低水平。这可能是因为盐分胁迫对作物造成离子胁迫,导致土壤压实和肥力下降,同时抑制了作物对养分的吸收,使作物发育不良、减产或死亡[32]。严凯等[33]在研究盐碱地条件下施氮量对作物产量与品质的影响中发现,随着施氮量的增加,水稻产量呈先上升后下降的抛物线趋势。高盐胁迫通过渗透胁迫和离子毒害严重抑制了白菜根系的生长和生理活性,极大降低了其吸收和转运氮素的能力。因此,尽管土壤中氮素充裕,但植物无法有效利用,导致肥料投入与产量严重脱节。

综上所述,施氮显著提高了温室白菜结球期的土壤全氮含量;高盐胁迫阻断了温室白菜的氮素吸收,使得收获期土壤中的NO_3^--N、NH_4^+-N和土壤有机质含量上升;高盐胁迫与高氮组合则通过严重损伤白菜PSⅡ光合机构,导致光合作用被极度抑制,

产量也较低盐胁迫下适宜施氮处理显著下降;适宜的盐胁迫和施氮组合能协同促进白菜生长,在低盐胁迫下,低氮处理通过协同增效,能显著提升白菜叶片的净光合速率和最终产量,可以实现资源的高效利用。因此,在盐渍化土壤上,应根据盐分水平精准施氮。本研究表明,在低盐渍化土壤(2 g/kg NaCl)条件下,低氮(0.05 g/kg N)策略是实现温室白菜节肥高产及可持续生产的最佳选择。

[参考文献]

[1] 赵耕毛,杨梦圆,陈硕,等. 我国盐碱地治理:现状、问题与展望[J]. 南京农业大学学报,2025,48(1):14-26.
ZHAO G M,YANG M Y,CHEN S,et al. Saline-alkali land management in China:current situation,problems and prospects[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2025,48(1):14-26.

[2] 王洁,吴晓宇,杨柳,等. 大白菜ACA基因家族的全基因组鉴定与表达分析[J]. 中国农业科学,2021,54(22):4851-4868.
WANG J,WU X Y,YANG L,et al. Genome-wide identification and expression analysis of ACA gene family in brassica rapa[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(22):4851-4868.

[3] 冯梅,张世卿,曹亚军,等. 盐胁迫对红花种子萌发及幼苗的生理效应[J]. 江苏农业科学,2020,48(22):144-148.
FENG M,ZHANG S Q,CAO Y J,et al. Effects of salt stress on seed germination and seedling physiology of safflower[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2020,48(22):144-148.

[4] 辛悦,邹彩瑜,时宇,等. 互花米草叶绿素荧光参数对盐胁迫的响应[J]. 环境生态学,2020,2(7): 8-12.
XIN Y,ZOU C Y,SHI Y,et al. Response of chlorophyll fluorescence parameters of *Spartina alterniflora* to salt stress[J]. Environmental Ecology,2020,2(7):8-12.

[5] 赵杏花,段娜,张淑媛,等. 盐胁迫对唐古特白刺枝叶性状的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(8):49-58.
ZHAO X H,DUAN N,ZHANG S Y,et al. Effect of NaCl stress on branch and leaf morphology and anatomical structure of *Nitraria tangutorum*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2023,51(8):49-58.

[6] 张珺穜,王婧,张莉,等. 盐碱地不同施氮量对土壤微生物区系与食葵产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(4):22-27,73.
ZHANG J T,WANG J,ZHANG L,et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on soil microflora and sunflower yield in saline-alkali soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(4):22-27,73.

[7] 刘新宇,武沛然,李彩凤,等. 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(1):108-116,125.
LIU X Y,WU P R,LI C F,et al. Effects of biochar and reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics of sugar beet under saline-alkali stress[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2021,49(1):108-116,125.

[8] TIAN T,WANG J,WANG H,et al. Nitrogen application alleviates salt stress by enhancing osmotic balance,ROS scavenging,and photosynthesis of rapeseed seedlings (*Brassica napus*)[J]. Plant Signaling & Behavior,2022,17(1):2081419.

[9] CUI G,ZHANG Y,ZHANG W,et al. Response of carbon and nitrogen metabolism and secondary metabolites to drought stress and salt stress in plants[J]. Journal of Plant Biology,2019,62(6):387-399.

[10] 王芳霞,孙凯,田涵,等. 不同有机物料配施化肥对陕西渭南盐渍化农田土壤的改良效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2026,54(2):56-68.
WANG F X,SUN K,TIAN H,et al. Improvement effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on salinized farmland soil in Weinan, Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2026,54(2):56-68.

[11] 刘学硕,崔佳月,刘光源,等. 氮肥减量配施碳基营养肥对大白菜产量和品质及土壤养分的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(6):132-142,154.
LIU X S,CUI J Y,LIU G Y,et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with carbon-based nutrient fertilizer on yield and quality of Chinese cabbage and soil nutrients[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2024,52(6):132-142,154.

[12] 梁永辉,王振华,李海强,等. 不同改良措施对南疆盐碱土壤特性及玉米和油葵生长的影响[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(6):1332-1341.
LIANG Y H,WANG Z H,LI H Q,et al. Effect of different improvement measures on soil characteristics and the growth of maize and oil sunflower in the saline soil area of southern Xinjiang,China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2024,41(6):1332-1341.

[13] 张旭萍,刘强,王锦,等. 盐碱胁迫下盐生植物与根际土壤微生物交互作用机制研究进展[J]. 土壤通报,2024,55(4):1191-1200.
ZHANG X P,LIU Q,WANG J,et al. Progress on the mechanism of interaction between saline plants and inter-rooted soil microorganisms under saline stress[J]. Chinese Journal of Soil Science,2024,55(4):1191-1200.

[14] 董心亮,王金涛,田柳,等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):364-372.
DONG X L,WANG J T,TIAN L,et al. Review of relationships between soil aggregates,microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023,31(3):364-372.

[15] 史祯琦,佘冬立,陈心逸,等. 盐分对土壤氨挥发与反硝化速率的影响[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(11):1458-1464.
SHI Z Q,SHE D L,CHEN X Y,et al. Effects of salinity on

soil ammonia volatilization and denitrification rates[J]. Journal of Ecology and Rural Environment，2021，37(11)：1458-1464.

[16] 吴玉洁，孙亚娇，郭昕晔，等. 麦秸和烟秆生物炭对氮肥硝化作用及N_2O和NH_3排放的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(11)：60-66，76.
WU Y J，SUN Y J，GUO X Y，et al. Impact of wheat straw and tobacco straw biochar on nitrification of nitrogenous fertilizer and emission of N_2O and NH_3[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2019，47(11)：60-66，76.

[17] ASLAM M T，IMRAN K，CHATTHA M U，et al. The critical role of nitrogen in plants facing the salinity stress：review and future prospective[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-napoca，2023，51(3)：13347.

[18] AKHTAR M，HUSSAIN F，ASHRAF M Y，et al. Influence of salinity on nitrogen transformations in soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2012，43(12)：1674-1683.

[19] LIANG H，SHI Q，LI X，et al. Synergistic effects of carbon cycle metabolism and photosynthesis in Chinese cabbage under salt stress[J]. Horticultural Plant Journal，2024，10(2)：461-472.

[20] NOOR J，AHMAD I，ULLAH A，et al. Enhancing saline stress tolerance in soybean seedlings through optimal NH_4^+/NO_3^- ratios：a coordinated regulation of ions，hormones，and antioxidant potential[J]. BMC Plant Biology，2024，24(1)：572.

[21] TIAN J，LIU B，GUO Q，et al. Effects of nitrogen on growth and physiological traits of feed mulberry under salt stress[J]. BMC Plant Biology，2025，25(1)：1015.

[22] 王佺珍，刘倩，高娅妮，等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报，2017，37(16)：5565-5577.
WANG Q Z，LIU Q，GAO Y N，et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica，2017，37(16)：5565-5577.

[23] HAN J，SHI J，ZENG L，et al. Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils[J]. Environmental Science and Pollution Research，2015，22(4)：2976-2986.

[24] 崔彦农，夏曾润，贾文，等. 低K^+条件下罗布麻对盐胁迫的光合响应机制[J]. 草业科学，2022，39(5)：922-929.
CUI Y L，XIA Z R，JIA W，et al. Photosynthetic response of *Apocynum venetum* to salt stress under low K^+ condition[J]. Pratacultural Science，2022，39(5)：922-929.

[25] CHEN S，ZHOU Q，FENG Y，et al. Responsive mechanism of *Hemerocallis citrina baroni* to complex saline-alkali stress revealed by photosynthetic characteristics and antioxidant regulation[J]. Plant Cell Reports，2024，43(7)：176.

[26] WANG L，ZHENG J，ZHOU G，et al. Moderate nitrogen application improved salt tolerance by enhancing photosynthesis，antioxidants，and osmotic adjustment in rapeseed (*Bassica napus* L.)[J]. Frontiers in Plant Science，2023，14：1196319.

[27] SIDDIQUI M H，MOHAMMAD F，KHAN M N，et al. Nitrogen in relation to photosynthetic capacity and accumulation of osmoprotectant and nutrients in brassica genotypes grown under salt stress[J]. Agricultural Sciences in China，2010，9(5)：671-680.

[28] 谢丰璞，王楠，高静，等. 干旱及复水循环对苗期药用大黄叶片光合碳同化功能和光化学活性的影响[J]. 西北植物学报，2023，43(11)：1872-1887.
XIE F P，WANG N，GAO J，et al. Effects of drought and rewatering cycle on photosynthetic carbon assimilation function and photochemical activity of rheum officinale baill leaves at seedling[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2023，43(11)：1872-1887.

[29] 周天江，王芳圆，韩焕勇，等. 灌溉定额对早熟棉品种叶片光合与叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农业学报，2025，34(10)：1801-1812.
ZHOU T J，WANG F Y，HAN H Y，et al. Effects of irrigation quotas on leaf photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of early-maturing cotton varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica，2025，34(10)：1801-1812.

[30] XU C，LI Q，LIU X，et al. Effects of nitrogen supply level on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of rice under salt stress[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture，2019：741.

[31] 唐玲，李倩中，荣立苹，等. 盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报，2015，35(10)：2050-2055.
TANG L，LI Q Z，RONG L P，et al. Effects of salt stress on the growth and leaf chlorophyll fluorescence in acer palmatum seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2015，35(10)：2050-2055.

[32] 高伟，席克勇，尹军良，等. 外源SiNPs对盐胁迫下生姜幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(9)：109-118.
GAO W，XI K Y，YIN J L，et al. Effects of exogenous SiNPs on growth and physiological characteristics of ginger seedlings under salt stress[J]. Journal of Northwest A&F University (Na-tural Science Edition)，2023，51(9)：109-118.

[33] 严凯，蒋玉兰，唐纪元，等. 盐碱地条件下施氮量和栽插密度对水稻产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料，2018(2)：67-74.
YAN K，JIANG Y L，TANG J Y，et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and transplanting density on yield and grain quality of rice on saline-alkaline land[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2018(2)：67-74.

（责任编辑：温晓平）