doi：10.11838/sfsc.1673-6257.19194

轻度盐胁迫下施氮量对小麦苗期的生理响应

杨　柳[1]，李絮花[1*]，胡　斌[2*]，刘　敏[1]，刘文博[1]，李金鑫[1]，张　静[1]，王子凤[1]

（1. 土壤资源高效利用国家工程实验室，山东农业大学资源与环境学院，山东　泰安　271018；
2. 山东省土壤肥料工作站，山东　济南　250000）

摘　要：通过研究轻度盐胁迫条件下，施氮量对不同品种小麦幼苗的生理响应，来筛选盐碱地上适宜的耐盐和氮素高效利用小麦品种，为黄河三角洲盐碱地的综合应用与开发提供支撑。以山东省东营市利津县渤海粮仓实验示范区的滨海轻度盐碱土为供试土壤，采用土壤培养方法，选择4个当地主流小麦品种，设置不同的氮肥用量水平（0、0.1、0.2和0.3 g/kg），研究不同小麦品种对盐碱土的响应，揭示氮肥用量对小麦氮素吸收利用和氮素代谢酶活性及其渗透调节物质的影响。结果表明在轻度盐胁迫下，随着氮肥施用量的增加，小麦的株高、干物质重、氮、钾、钠的累积量均呈增加趋势，在T3处理时最佳；与CK相比，T3处理时小麦的干物质重、氮、磷、钾、钠的累积量分别增加了87.64%、149.11%、84.51%、117.78%、39.60%；而叶片硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量和氮、钾含量都呈先增加后降低的趋势，在T2处理时最佳，与CK相比，分别增加了122.40%、74.54%、37.33%、22.15%。供试品种中，山农28号的小麦株高、干物质重、氮、钾、钠的累积量对氮肥施用量的响应最大，且施氮量为0.2 g/kg时小麦叶片硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量和氮、钾含量均达到最大值。综上所述，轻度盐胁迫条件下，4个小麦品种对氮素利用存在显著差异，山农28号小麦表现出较高的氮素利用效率和较高的盐胁迫适应性，在高氮（0.3 g/kg）时小麦的生长量、氮、钾、钠的累积量最佳，在中氮（0.2 g/kg）时硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量和氮、钾含量最佳。

关键词：小麦；施氮量；生长；盐胁迫；生理

目前，世界上存在着不同类型的盐碱地约1×10^9 hm^2，约占全球可耕地面积的10%[1]。我国盐渍土总面积约为0.36亿hm^2，占全国可利用土地面积的4.88%[2]。西北、华北、东北地区及沿海是我国盐渍土的主要集中分布地区。研究表明，盐胁迫抑制植株的生长，减少植物的光合作用，影响某些特定的酶或代谢过程。因此改造和改良盐碱地刻不容缓。

小麦是我国三大粮食作物之一，其产量的高低严重影响我国粮食安全。研究表明，施用氮肥不仅能降低对植物的盐害作用，还影响作物对其他营养元素的吸收，提高作物产量[3-4]。因此，筛选在盐胁迫下“耐盐高氮高效”型作物品种，是提高小麦养分利用效率，减少氮肥损失的重要途径[5]。

目前，国内外的学者主要研究的是正常生长条件下不同氮素水平对不同小麦品种的氮素利用[6-7]，不同胁迫条件下不同氮素水平对小麦生理特性的影响[8-9]，而其对于盐胁迫环境下的耐盐高氮高效型作物品种研究较少。本试验是在轻度盐胁迫下，采用土培试验研究不同氮素水平对不同小麦品种氮素利用规律，探索氮素与盐分的交互作用。

1　材料与方法

1.1　试验地点与材料

试验于2018年3 ~ 4月于山东农业大学资源与环境学院试验基地采用土壤培养的方法进行。供试土壤为采集于山东省东营市利津县渤海粮仓实验示范区的滨海盐碱土，土壤基本理化性质：有机质18.48 g/kg，碱解氮52.39 mg/kg，有效磷13.99 mg/kg，速效钾230 mg/kg，pH值8.79，电导率849 μS/cm（土水比1∶5），含盐量0.22%（轻度盐碱地划分0.10% ~ 0.25%）。

供试小麦品种为山东省黄河三角洲区域的

收稿日期：2019-05-07；**录用日期：**2019-07-08

基金项目：山东省重点研发计划（2017CXGC0301）；“十三五”国家重点研发计划项目（2016YFD0200402）。

作者简介：杨柳（1995-），女，山东烟台人，硕士研究生，主要研究植物营养调控和机理。E-mail：1017053432@qq.com。

通讯作者：李絮花，E-mail：lixh64@163.com；胡斌，E-mail：sdtfmail@163.com。

主流小麦品种4个：济麦22号、山农25号、山农27号和山农28号，由山东省东营渤海农场提供。

1.2　试验设计

本试验设置二个试验因素：施氮量（A）设4个N肥用量水平：CK，空白对照（只施PK肥）；T1，N施用量0.1 g/kg；T2，N施用量0.2 g/kg；T3，N施用量0.3 g/kg；4个小麦品种（B）：B1，济麦22；B2，山农25；B3，山农27；B4，山农28。每盆装风干土1.2 kg，每盆控制P_2O_5施用量0.1 g/kg，K_2O施用量0.2 g/kg，条件一致。供试肥料为尿素（N 46%）、过磷酸钙（P_2O_5 12%）和硫酸钾（K_2O 51%）。小麦种子均用蒸馏水进行浸种。将肥料与土壤混合均匀，每盆播小麦种子18粒，待出苗后统计各处理出苗率，并于两叶一心期定苗12株，每个处理重复3次，随机区组排列，管理与常规盆栽试验相同。定苗后30 d取样。

1.3　样品采集与处理

1.3.1　样品采集

培养30 d后，将全部苗期小麦取出，先用自来水冲洗，用蒸馏水洗净，吸水纸吸干水分，测定每株幼苗的株高、植株鲜重。取部分叶片鲜样低温保存，以供测定生理生化指标，剩余植株样经105℃杀青，80℃烘干，磨碎以供测定植株养分。盆栽土壤全部收集进行硝态氮、铵态氮测定，之后风干、磨细、过筛进行养分测定。

1.3.2　测定项目与方法

硝酸还原酶：活体法测定；可溶性蛋白：参照《现代植物生理学试验指南》谷氨酰胺合成酶测定方法[10]；植株全氮采用H_2SO_4–H_2O_2消煮、半微量开氏法测定；火焰光度法测定植株K、Na。

2　结果与分析

2.1　不同处理对小麦苗期生长的影响

由表1可以看出，在盐胁迫条件下，施用氮肥能明显促进小麦苗期的生长，缓解盐害。施氮量处理间小麦干重和株高存在显著差异（F=18.84**，F=13.94**），施氮量增加小麦的干重明显提高，但高施氮量条件下的增加量较小。与CK处理相比，处理T1、T2、T3小麦干重分别增加26.44%、68.53%和87.64%，小麦株高分别增加11.51%、28.38%、42.68%，小麦的干重和株高均以T3（N 0.3 g/kg）最高，其次是T2处理。

表1　不同处理对小麦苗期干重和株高的影响

处理		干重（g/盆）	株高（cm）
A	CK	0.89 ± 0.14c	8.95 ± 1.78b
	T1	1.21 ± 0.28b	9.98 ± 2.21b
	T2	1.50 ± 0.36a	11.49 ± 2.80a
	T3	1.67 ± 0.42a	12.77 ± 2.87a
	$F_{施氮量}$	18.84**	13.94**
B	B1	1.27 ± 0.24b	9.31 ± 0.88c
	B2	1.18 ± 0.41b	8.77 ± 2.07c
	B3	1.27 ± 0.33b	11.48 ± 2.58b
	B4	1.55 ± 0.61a	13.63 ± 2.36a
	$F_{小麦品种}$	4.07*	24.33**
	$F_{施氮量\times小麦品种}$	1.70^{ns}	0.56^{ns}

注：表中同一列数据后标以不用字母表示在0.05水平下差异显著。** 表示在0.01水平上差异显著，* 表示在0.05水平上差异显著，ns表示差异不显著。下同。

由表1还可以看出，4个小麦品种的干重与株高存在显著差异（F=4.07*、F=24.33**）。处理中以B4（山农28号）的小麦干重和株高最大，济麦22号、山农25号和山农27号3个品种的小麦干重没有显著差异，但株高却存在明显差异。

表明供试小麦品种在轻度盐胁迫下对氮肥的响应存在明显差异，以B4（山农28号）的生长势最好，对氮肥的反应也最敏感。

图1结果表明，小麦苗期植株干重在施氮量与小麦品种二因素间互作效应差异不显著（F=1.7 ns）。不施用氮肥CK和施氮量为N 0.1 g/kg的T1处理不同小麦的植株干重基本相当，以B1（济麦22号）略高。在施氮量T2和T3条件下不同小麦品种间的植株干重存在显著差异，以B4（山农28号）最优。从图1中还可以看出，与CK比较，除B1（济麦22号）外，随着施氮量的增加，其他3个品种小麦的干重呈增加的趋势，其中B4（山农28号）变化更明显，也以T3B4处理组合的小麦干物质量最大，但为减少施肥量可以选择T2B4处理组合。

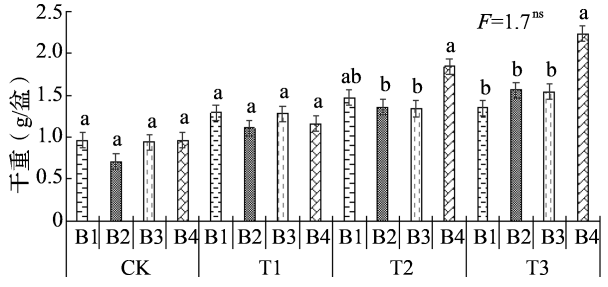

图1　苗期小麦干重的施氮量和小麦品种的二因素互作的比较

注：不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。下同。

2.2　不同处理对小麦苗期叶片氮含量和氮素累积的影响

图 2、3 表明，小麦苗期叶片氮含量和氮素累积量在施氮量与小麦品种二因素间互作效应显著（F=10.52**，F=57.19**）。在不施用氮肥 CK 条件下，B1（济麦 22 号）处理的氮含量和氮素累积量较高，说明 B1 品种的氮素累积效率较高。在施用氮肥的 T1 条件下，以 B2（山农 15 号）处理的氮含量和氮素累积量最低，表明供试品种中以 B2 对氮肥的反映最不敏感。在施用氮肥的 T2、T3 条件下，B4（山农 28 号）的苗期氮含量和氮素累积量最高，分别为 22.08 g/kg 和 40.52 mg/盆，22.72 g/kg 和 50.68 mg/盆，显著高于其它品种，进一步表明山农 28 号对氮肥的反应较好。从施氮量看出，B1、B2 二个小麦品种随着施氮量的增加，氮含量和氮素累积量呈现先增加后降低的趋势，在施氮量 T2 时最佳；B3 随着施氮量的增加，氮含量逐渐增加，在 T3 时有所下降，氮素累积量是随施氮量的增加，不断增加的；B4 则随施氮量的增加，氮含量和氮素累积量呈现不断增加的趋势，在施氮量 T3 时氮素累积量最大；且以 B4（山农 28 号）随施氮量的变化更为显著，因此供试处理中以 T3B4 处理的小麦苗期氮素累积量最大。

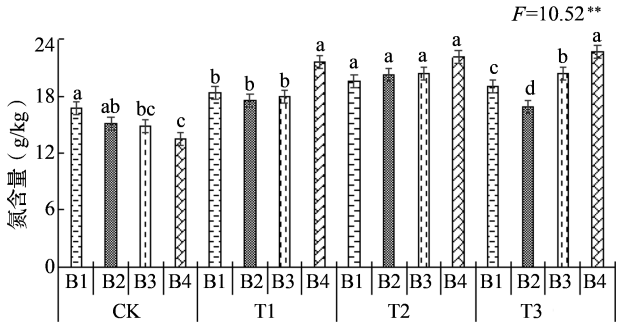

图 2　苗期小麦叶片氮含量的施氮量和小麦品种的二因素互作的比较

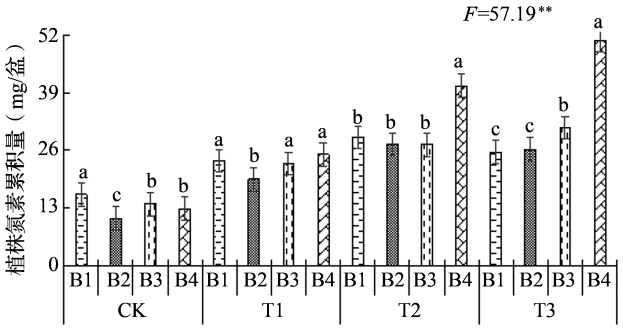

图 3　苗期小麦叶片氮素累积的施氮量和小麦品种的二因素互作的比较

2.3　不同处理对小麦苗期叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量的影响

由表 2 可以看出，在盐胁迫条件下，施用氮肥能明显提供小麦叶片硝酸还原酶的活性和可溶性蛋白的含量，提高小麦应对盐胁迫的能力。不同施氮量间叶片的硝酸还原酶的活性和可溶性蛋白的含量存在显著差异（F=64.26**、F=42.78**），施氮量均明显增加叶片的硝酸还原酶的活性和可溶性蛋白含量，叶片的硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量在施氮量为 T2 时达到最大值。与 CK 处理相比，T1、T2、T3 处理的叶片硝酸还原酶活性分别增加了 29.19%、122.40%、106.79%；可溶性蛋白含量分别增加了 39.74%、74.54%、64.46%。不同的施氮量处理间以 T2 和 T3 处理的叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量较高，显著优于 T1、CK 处理。

表 2　小麦苗期叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量

	处理	硝酸还原酶活性［N μg/（g·h）］	可溶性蛋白（mg/g）
A	CK	4.42 ± 2.24c	20.23 ± 2.16c
	T1	5.71 ± 2.26b	28.27 ± 8.03b
	T2	9.83 ± 3.74a	35.31 ± 10.74a
	T3	9.19 ± 1.06a	33.27 ± 9.22a
	$F_{施氮量}$	64.26**	42.78**
B	B1	8.50 ± 3.43b	25.40 ± 8.55b
	B2	4.76 ± 2.62d	24.76 ± 3.14b
	B3	6.30 ± 2.79c	27.38 ± 5.19b
	B4	9.60 ± 2.45a	39.55 ± 12.24a
	$F_{小麦品种}$	43.93**	45.71**
	$F_{施氮量\times小麦品种}$	5.80**	7.35**

从不同小麦品种看，4 个小麦品种叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量存在显著差异（F=43.93**、F=45.71**）。叶片硝酸还原酶活性和可溶性蛋白含量均以山农 28 号最高，其次是济麦 22 号，山农 25 号最低。表明在轻度盐胁迫下供试小麦品种对氮肥的响应存在显著差异，以 B4（山农 28 号）对氮肥的反应最好。

2.4　不同处理对小麦苗期 P、Na、K 吸收与分配的影响

由表 3 可以看出，不同施氮量处理间植株体内 P 含量和 P 累积量均存在显著差异（F=11.30**，F=107.00**），在盐胁迫条件下，施氮量增加，小

麦植株体内 P 含量逐渐降低，而植株体内 P 的累积量增加。这是植株生长量增加的稀释效应。与处理 T1 相比，T2、T3 处理植株的 P 含量分别降低了 3.06% 和 9.89%。以施氮量为 N 0.3 g/kg 的 T3 处理植株 P 含量最低。施氮量增加植株 P 累积量明显增加，T2 和 T3 处理植株 P 的累积量差异不显著。与处理 CK 相比，处理 T1、T2、T3 的 P 累积量分别增加 49.05%、76.59% 和 84.51%。从不同小麦品种看，小麦体内 P 含量和 P 累积量均存在显著差异（F=121.56**，F=13.07**）。4 个小麦品种均以 B2（山农 25 号）的 P 含量和 P 累积量最高，B1（济麦 22 号）次之。

表 3　小麦苗期叶片磷、钠、钾含量和累积量

处理		磷含量（g/kg）	钾含量（g/kg）	钠含量（g/kg）	植株磷累积量（mg/盆）	植株钾累积量（mg/盆）	植株钠累积量（mg/盆）
A	CK	6.62 ± 1.24b	14.87 ± 1.43c	1.68 ± 0.27a	5.81 ± 0.79c	13.28 ± 2.15d	1.49 ± 0.27c
	T1	7.18 ± 1.04a	16.87 ± 1.19b	1.55 ± 0.35b	8.66 ± 1.03b	20.43 ± 1.64c	1.78 ± 0.21b
	T2	6.96 ± 1.22a	18.25 ± 0.93a	1.35 ± 0.18c	10.26 ± 1.27a	27.37 ± 3.96b	2.03 ± 0.42a
	T3	6.47 ± 0.85b	17.25 ± 1.27b	1.25 ± 0.07d	10.72 ± 2.29a	28.92 ± 3.56a	2.08 ± 0.45a
	$F_{施氮量}$	11.30**	37.80**	16.34**	107.00**	590.72**	54.74**
B	济麦 22 号	7.32 ± 0.31b	17.47 ± 1.2a	1.27 ± 0.13c	9.32 ± 1.66a	22.47 ± 4.37b	1.6 ± 0.18c
	山农 25 号	8.04 ± 0.80a	16.85 ± 1.7ab	1.44 ± 0.25b	9.38 ± 2.32a	20.37 ± 6.65c	1.63 ± 0.27c
	山农 27 号	6.09 ± 0.59c	15.69 ± 0.83c	1.47 ± 0.17b	7.72 ± 1.51b	20.31 ± 4.32c	1.86 ± 0.29b
	山农 28 号	5.79 ± 0.68d	16.84 ± 2.31b	1.56 ± 0.29a	9.03 ± 3.50a	26.84 ± 8.54a	2.29 ± 0.46a
	$F_{小麦品种}$	121.56**	9.74**	39.92**	13.07**	108.32**	76.33**
	$F_{施氮量 \times 小麦品种}$	8.61**	4.46**	5.91*	11.19**	51.19**	9.00**

由表 3 还可以看出，在盐胁迫条件下，施用氮肥能明显降低苗期小麦植株体内的 Na 含量，缓解盐害。不同施氮量处理间植株 Na 含量和 Na 累积量均存在显著差异（F=16.34**，F=54.74**），施氮量增加 Na 含量明显降低，但 Na 的总累积量略有增加，这是植株生长量增加的稀释效应。与处理 CK 相比，T1、T2、T3 处理植株的 Na 含量分别降低了 7.74%、19.64% 和 25.60%。以施氮量为 N 0.3 g/kg 的 T3 处理植株 Na 含量最低，其次是 T2 处理。施氮量增加植株 Na 累积量明显增加，T2 和 T3 处理植株 Na 的累积量差异不显著。与处理 CK 相比，处理 T1、T2、T3 的 Na 累积量分别增加 19.46%、36.24% 和 39.60%。从不同小麦品种看，小麦体内 Na 含量和 Na 累积量均存在显著差异（F=39.92**，F=76.33**）。4 个小麦品种均以 B4（山农 28 号）的 Na 含量和 Na 累积量最高，B3（山农 27 号）次之，B1（济麦 22 号）最低。

由表 3 还可以看出，在盐胁迫条件下，施用氮肥能明显提高苗期小麦植株体内的 K 含量，缓解盐害。施氮量处理间植株体内 K 含量和 K 累积量均存在显著差异（F=37.80**，F=590.72**），随着施氮量的增加植株 K 含量呈现先增加后降低的趋势，在 T2 处理时达到最高，为 18.25 g/kg，显著高于其他处理。植株 K 总累积量随施氮量增加呈增加趋势，在 T3 处理时达到最高，这也是植株生长量增加的稀释效应。与 CK 处理相比，T1、T2、T3 处理植株 K 含量分别增加 13.45%、22.73% 和 16.01%。与处理 CK 相比，处理 T1、T2、T3 的 K 累积量分别增加 53.84%、106.11% 和 117.78%。从不同小麦品种看，4 个小麦品种间 K 含量以 B1（济麦 22 号）最高，B3（山农 27 号）最低。而 K 的累积量则以 B4 处理最高。

表明供试小麦品种在轻度盐胁迫下对氮肥的响应表现不同，以山农 28 号的吸收钠、钾能力最好，对氮肥的反应也最敏感。

2.5　不同处理对苗期小麦相关性分析

由表 4 可以看出，在盐胁迫条件下，施氮量与不同品种小麦幼苗的每盆干重、N、K 含量，N、K 累积量、硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量呈正相关，表明施用氮肥能促进小麦养分吸收，提高应对盐胁迫的能力，进而促进小麦生长。施氮量与植株 P、Na 含量呈显著的负相关关系，但与 P、Na 的累

积量呈显著正相关关系。表明施用氮肥没有显著抑制植株对磷、钠的吸收，而是通过促进小麦生长、致使生长量增加的稀释效应。不同处理叶片硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量与植株生长量—干重间呈极显著的正相关关系，表现出小麦生长发育与氮素代谢间的相互依存关系。N、K、Na 累积量间存在显著正相关性，而 Na 含量与 K 含量呈负相关关系。

表 4　不同处理对小麦苗期干重、生理生化指标与养分累积量的相关性分析

	氮水平	干重	N 含量	P 含量	K 含量	Na 含量	N 累积量	P 累积量	K 累积量	Na 累积量	硝酸还原酶活性	可溶性蛋白含量
氮水平	1											
干重	0.688**	1										
N 含量	0.655**	0.710**	1									
P 含量	–0.104	–0.238	–0.06	1								
K 含量	0.561**	0.439**	0.694**	0.323*	1							
Na 含量	–0.589**	–0.390**	–0.312*	–0.229	–0.492**	1						
N 累积量	0.770**	0.857**	0.864**	–0.260	0.602**	–0.435**	1					
P 累积量	0.768**	0.661**	0.655**	0.152	0.729**	–0.646**	0.785**	1				
K 累积量	0.802**	0.814**	0.794**	–0.164	0.719**	–0.525**	0.967**	0.862**	1			
Na 累积量	0.550**	0.718**	0.630**	–0.536**	0.291*	–0.057	0.840**	0.513**	0.788**	1		
硝酸还原酶活性	0.622**	0.591**	0.571**	–0.397**	0.423**	–0.264	0.649**	0.443**	0.656**	0.586**	1	
可溶性蛋白含量	0.528**	0.677**	0.740**	–0.372**	0.419**	–0.096	0.804**	0.471**	0.740**	0.755**	0.663**	1

注：**、* 分别表示在 0.01、0.05 水平上相关显著。

3　讨论

盐胁迫通过降低植物根系的水分吸收能力，引起细胞生理干旱，从而产生渗透胁迫和离子毒害[11]，进而抑制植物的生长[12]，导致营养生长和生殖生长期的缩短[13]。有研究认为，氮肥能够促进作物的生长和氮素累积，增加植物生物量和株高等[14-16]，进而缓解盐分的危害[17-19]。本研究发现，在轻度盐胁迫条件下，小麦的氮素累积量、干重和株高随施氮量的增加而增加。而高氮供应能够提高山农 25 号、山农 27 号和山农 28 号的小麦干重，却降低了济麦 22 号小麦干重积累。施氮量 N 0.2 g/kg 时济麦 22 号和山农 25 号的氮素累积量最大，而山农 27 号和山农 28 号的氮素累积量在施氮量 N 0.3 g/kg 时达到最大值。表明在轻度盐胁迫下 4 个小麦品种对氮肥的响应存在明显差异。适度的供氮才能促进植株的氮素吸收，增加株高和干重，促进小麦生长。这与张洋等[20]的施氮能够增加生物量、株高的结论一致。

硝酸还原酶是作物氮代谢的关键酶，也是一个诱导酶。通过催化硝态氮还原为亚硝态氮，进入植物体后在硝酸还原酶作用下将硝态氮进一步还原成铵，来影响植物生长发育及蛋白质的合成[21]。有研究表明，氮肥能够提高叶片硝酸还原酶活性，从而提高植株的氮素利用效率[22-23]。本研究发现，在轻度盐胁迫条件下，小麦叶片硝酸还原酶的活性随施氮量的增加呈先升高后降低的趋势，在中度施氮量 N 0.2 g/kg 时，叶片硝酸还原酶的活性达到最大值。其中山农 28 号小麦叶片硝酸还原酶的活性最高，其次是济麦 22 号，山农 25 号最低。表明不同品种小麦对氮肥的响应存在差异，不同品种小麦的硝酸还原酶活性也存在差异。而适量的氮肥能提高小麦叶片 NR 活性，这与门中华等[24]报道的适当增施氮肥会提高 NR 活性的结论一致。

植物处于逆境时，会进行自我调整与适应，形成一些新的蛋白或者使得原有蛋白质的含量增加来协调细胞与外界渗透压的平衡[25]，进而缓解盐基离子对细胞的毒害作用，因此植株体内可溶性蛋白含量的高低可反映植物对逆境条件的耐受能力[26-27]。本研究发现，在轻度盐胁迫条件下，随

着施氮量的增加，不同品种小麦苗期叶片可溶性蛋白的含量均呈先升高后降低的趋势。在中度施氮量N 0.2 g/kg时，叶片中的可溶性蛋白质含量达到最大值。这与王雨等[28]的施氮会促进植株在逆境条件下大量合成可溶性蛋白质来增加渗透调节能力，增强幼苗的抗胁迫能力的研究结果一致。供试的4个小麦品种中，山农28号小麦叶片可溶性蛋白含量在同一水平施氮量处理下均显著高于其他3个品种，山农27次之，山农25号的可溶性蛋白含量最低。且随着施氮量增加，山农28号小麦叶片可溶性蛋白含量增加的更为明显，表明在轻度盐胁迫下山农28号小麦对施用氮肥产生可溶性蛋白缓解盐害的能力最好。

随着盐胁迫程度的加深，Na在植株各部位中不断积累，而Na在叶片中的过量积累会抑制植株的生长发育，造成Na离子毒害[29-30]。因此植株通过控制钾的活性和表达来使体内保持高浓度的K^+和低浓度的Na^+[31]。本文研究结果表明，在轻度盐胁迫条件下，植株Na含量随施氮量的增加而降低，而植株K含量随施氮量的增加而增加。表明适当的增施氮肥，能够刺激植株体内K的活性和表达，植株通过K^+和Na^+之间的拮抗作用，使植株体内的Na含量减少，促进植株在盐胁迫环境中生长。本研究还发现不同品种小麦的钠累积量和钾累积量均随施氮量的增加而增加，这是由于生物量增加的稀释效应。从不同品种小麦对氮肥用量的反映来看，以济麦22号小麦的植株体内Na含量最低，钾含量最高，山农25号次之。表明不同品种小麦对盐胁迫下控制钾的活性和表达的能力是不同的，济麦22号小麦的能力更强。在施氮处理下，以山农28号的钠累积量和钾累积量最大，济麦22号小麦的钾累积量次之，山农27号小麦的钠累积量第二，这是生物量增加的稀释效应。

4　结论

在轻度盐胁迫下，随着氮肥施用量的增加，小麦的株高、干物质重、氮、磷、钾、钠的累积量均呈增加趋势；而叶片硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量和氮、钾含量都呈先增加后降低的趋势，在中度施氮量N 0.2 g/kg时达到最大值。

轻度盐胁迫条件下，4个小麦品种对氮肥用量的响应存在显著差异，山农28号小麦表现出较高的氮素利用效率和较高的盐胁迫适应性，在高氮（0.3 g/kg）时小麦的生长量、氮、钾、钠的累积量最佳，在中氮（0.2 g/kg）时硝酸还原酶活性、可溶性蛋白含量和氮、钾含量最佳。但各个品种均不是苗期对氮素营养既高效吸收又高效利用的品种，4个品种在田间整个生育期对氮素营养的响应还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 薛延丰，刘兆普. 不同浓度NaCl和Na_2CO_3处理对菊芋幼苗光合及叶绿素荧光的影响[J]. 植物生态学报，2008，(1)：161-167.

[2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报，2008，45(5)：837-845.

[3] Gomez J. Salinity and nitrogen fertilization affecting the macro-nutrient content and yield of sweet pepper plants[J]. Plant Nutr，1996，(19)：353-359.

[4] Khan M G，Silberbush M，Lips S H. Physiological studies of salinity and nitrogen interaction in alfalfa. I. Biomass productionand root development[J]. Plant Nutr，1994，(17)：657-668.

[5] 米国华，陈范骏，春亮，等. 玉米氮高效品种的生物学特征[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(1)：155-159.

[6] 杜保见，郜红建，常江，等. 小麦苗期氮素吸收利用效率差异及聚类分析[J]. 植物营养与肥料学报，2014，20(6)：1349-1357.

[7] 赵丽，杨家蘅，李胜楠，等. 不同穗型小麦品种小花发育成粒对氮肥的响应[J]. 中国生态农业学报，2017，25(11)：1636-1642.

[8] 米美多，慕宇，代晓华，等. 花后高温胁迫下不同施氮量对春小麦抗氧化特性的影响[J]. 江苏农业科学，2017，45(1)：52-56.

[9] 文佩，陈小兵，张乐乐，等. 盐旱交叉胁迫对各施氮水平下小麦苗期的影响[J]. 土壤，2019，51(2)：324-329.

[10] 中国科学院上海植物生理研究所，上海市植物生理学会. 现代植物生理学试验指南[M].北京：科学出版社，1999. 156-158.

[11] 张仁陟，李小刚，胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报，1999，6(3)：221-226.

[12] Flowers T J. Improving crop salt tolerance[J]. Journal of Experimental Botany，2004，55：307-319.

[13] 李育才，陈有清，王忠智，等. 盐碱地春小麦低产原因及高产栽培技术[J]. 山西农业科学，1990，(2)：16-17.

[14] 张艳，张洋，陈冲，等. 水分胁迫条件下施氮对不同水氮效率基因型冬小麦苗期生长发育的影响[J]. 麦类作物学报，2009，29(5)：844-848.

[15] Wang C，Liu W，Li Q，et al. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions[J].

Field Crops Research，2014，165：138–149.
[16] 吴茜，丁佳，闫慧，等. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山5个树种幼苗生长和生物量的影响[J]. 植物生态学报，2011，35（3）：256–267.
[17] 代建龙，卢合全，李振怀，等. 盐胁迫下施肥对棉花生长及氮素利用的影响[J]. 应用生态学报，2013，24（12）：3453–3458.
[18] 彭玲，田歌，于波，等. 供氮水平和^{15}N稳定性对苹果矮化砧M9 T337幼苗生长及吸收、利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24（2）：461–470.
[19] 沙建川，葛顺峰，丰艳广，等. 不同硝态氮供应水平对平邑甜茶生长及氮素吸收利用和分配特性的影响[J]. 中国农学通报，2018，34（3）：98–103.
[20] 张洋，翟丙年. 水分胁迫条件下氮素营养对不同冬小麦基因型的生理效应[J]. 麦类作物学报，2010，30（3）：492–495.
[21] 刘伟，潘廷国，柯玉琴. 盐胁迫对甘薯叶片氮代谢的影响[J]. 福建农业大学报，1998，（4）：107–111.
[22] 隋利，易家宁，王康才，等. 不同氮素形态及其配比对盐胁迫下紫苏生理特性的影响[J]. 生态学杂志，2018，37（11）：3277–3283.
[23] 高祖明，张耀栋，张道勇，等. 氮磷钾对叶菜硝酸盐积累和硝酸还原酶、过氧化物酶活性的影响[J]. 园艺学报，1989，（4）：0513–0353.
[24] 门中华，李生秀. 水培硝态氮浓度对冬小麦幼苗氮代谢的影响[J]. 广西植物，2010，30（4）：544–550.
[25] 刘风歧，刘杰淋，朱瑞芬，等. 4种燕麦对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 草业学报，2015，24（1）：183–189.
[26] 岳健敏，任琼，张金池. 植物盐耐机理研究进展[J]. 林业科技开发，2015，29（5）：9–13.
[27] 宿越，李天来，杨凤军，等. 外源水杨酸对NaCl胁迫下番茄幼苗保护酶活性和渗透调节物质含量的影响[J]. 沈阳农业大学学报，2009，40（3）：273–276.
[28] 王雨，唐晓清，施晟璐，等. 不同施氮水平对盐胁迫下苗期菘蓝生理特性及根中（R，S）–告依春含量的影响[J]. 核农学报，2017，31（2）：394–401.
[29] 韩志平，郭世荣，郑瑞娜，等. 盐胁迫对小型西瓜幼苗体内离子分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19(4)：908–917.
[30] 景宇鹏，李跃进，蔺亚莉，等. 玉米耐Na_2CO_3胁迫的生理响应及耐盐碱性综合评价[J]. 中国土壤与肥料，2019，（5）：179–186.
[31] Parida A K，Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants：a review[J]. Ecology Toxicology and Environmental Safety，2005，60（3）：324–349.

Physiological response of nitrogen fertilization to wheat seedling under mild salt stress

YANG Liu[1]，LI Xu-hua[1*]，HU Bin[2*]，LIU Min[1]，LIU Wen-bo[1]，LI Jin-xin[1]，ZHANG Jing[1]，WANG Zi-feng[1]（1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil Resources，College of Resources and Environment，Shandong Agricultural University，Taian Shandong 271018，2. Shandong Soil and Fertilizer Workstation，Jinan Shandong 250000）

Abstract：In this paper，the physiological response of nitrogen application to wheat seedlings of different varieties under mild salt stress was studied to screen suitable salt-tolerant and nitrogen-efficient wheat varieties on saline-alkali land，which could provide support for the comprehensive application and development of saline-alkali land in the Yellow River delta. The experiments with four nitrogen fertilizer levels（0，0.1，0.2 and 0.3 g/kg）and four major local wheat varieties were conducted to study the response of the different wheat varieties on saline soils，reveal the effects of nitrogen fertilizer application on nitrogen uptake of wheat，nitrogen metabolism enzyme activity and the influence of osmotic regulation substances at the coastal mildly saline alkaline soil in Dongying city of Shandong province，using soil cultivation method. Results showed that，under mild salt stress，plant height，dry matter weight，nitrogen，potassium and sodium uptake of wheat all increased with the increase of nitrogen fertilizer application. Compared with CK，the accumulation of dry matter，nitrogen，phosphorus，potassium and sodium increased by 87.64%，149.11%，84.51%，117.78% and 39.60% respectively under T3 treatment. However，nitrate reductase activity，soluble protein content，nitrogen and potassium content of wheat seedlings increased first and then decreased，which were the best at T2 treatment. Compared with CK，it increased by 122.40%，74.54%，37.33% and 22.15%，respectively. Among the tested varieties，wheat plant height，dry matter weight，and absorption amounts of N，K and Na of Shannong 28 wheat had the largest response to nitrogen fertilizer application amount. And nitrate reductase activity，soluble protein content and N and K content in wheat leaves reached the maximum value when N application amount was N 0.2 g/kg. In summary，under mild salt stress，there were significant differences in nitrogen use among the four wheat varieties. Shannong 28 wheat showed higher nitrogen utilization efficiency and higher salt stress adaptability. At high nitrogen level（0.3 g/kg），wheat had the best growth，nitrogen，potassium and sodium absorption，while at medium nitrogen（0.2 g/kg），it had the best nitrate reductase activity，soluble protein content and nitrogen and potassium content.

Key words：wheat；nitrogen application；growth；salt stress；physiology