水稻耐鹽突變品系 CNY1031130 鹽分耐受性之探討

周思儀*、蔡宜君、張文柔、吳泓書*
行政院農業委員會農業試驗所嘉義分所農藝系

摘要

為開發水稻耐鹽品系以因應氣候變遷之衝擊，本研究以 200 mM NaCl 水耕溶液模擬鹽分逆境，由疊氮化鈉(sodium azide; NaN_3)誘變的「臺粳 2 號(TK2)」突變庫中篩選出耐鹽突變品系 CNY1031130，分別於三葉齡、五葉齡、七葉齡及最高分蘗期等 4 個時期，前後以 200 mM NaCl 水耕溶液及電導度 10 dS m^{-1} 鹽水給予鹽分逆境處理。結果發現，耐鹽品系 CNY1031130 無論在幼苗期及最高分蘗期，其耐鹽性表現均優於鹽分敏感品系 SM332 與對照親本 'TK2'，顯示 CNY1031130 具有較佳耐鹽性。進一步瞭解 CNY1031130 對鹽分濃度的耐受性表現，又於五葉齡幼苗期分別以 150、200、250 及 300 mM 的 NaCl 濃度進行鹽分逆境處理，發現耐鹽品系 CNY1031130 無論在低濃度或高鹽度的逆境處理下，對鹽分的耐受性均優於 SM332 與 'TK2'，顯示 CNY1031130 為幼苗期高耐鹽性品系。另採集臺南市將軍區的鹽化土壤進行栽種試驗，發現以耐鹽品系 CNY1031130 的幼苗存活率、幼苗高度、根乾重與綠色葉片數量最高，顯示耐鹽品系 CNY1031130 幼苗可正常生長於鹽化土壤中。進一步研究各品種(系)於鹽分逆境下的生理反應以探討其耐受性之原因，發現耐鹽品系 CNY1031130 與 IRRI 耐鹽品系 Pokkali 的 malondialdehyde (MDA)含量最低，因此推測耐鹽品系 CNY1031130 遭受較低氧化逆境程度而具較高的鹽分耐受性。

關鍵詞：水稻、突變品系、耐鹽。

Salt Tolerant Characters of Salt Tolerant Rice Mutant CNY1031130

Szu-Yi Chou*, I-Chun Tsai, Wen-Jou Chang and Hong-Shu Wu*
Department of Agronomy, Chiayi Agricultural Experiment Station, Taiwan Agricultural Research Institute, Chiayi 60044, Taiwan ROC.

ABSTRACT

In order to develop the salt tolerant line for coping with climate change, 200 mM NaCl solution was used to screen the salt-tolerant line(s) developed from mutants of rice cultivar 'Taikeng 2 (TK2)' which were induced by sodium azide (NaN_3). The salt tolerant mutant line, CNY1031130, was selected. To further evaluate the salt tolerance characters of CNY1031130, seedlings of three-leaf, five-leaf, seven-leaf, and maximum tillering stages were treated with 200 mM NaCl and EC10 dS m^{-1} salt water, respectively. Results showed that CNY1031130 exhibited higher tolerance to salinity than both salt sensitive line 'SM332' and control cultivar 'TK2', implying that the salt tolerant characteristic of CNY1031130 existed. By applying NaCl solutions at the concentrations of 150, 200, 250 and 300 mM to five-leaf stage seedlings of CNY1031130, it maintained a better salt tolerance than others. When planting 'CNY1031130', 'SM332' and 'TK2' in saline soil collected from Jiangjun District of Tainan City, it showed that the survival rate, seedling height, root dry weight, and green leaves number of CNY1031130 were better than others, suggesting that seedlings of CNY1031130 can better grow in salty soil. In the physiological study, both CNY1031130 and salt tolerant variety 'Pokkali' selected by International Rice Research Institute had lower content of

*通信作者, gracechou@dns.caes.gov.tw;
hanzsu@ dns.caes.gov.tw
投稿日期：2015 年 11 月 2 日
接受日期：2015 年 12 月 13 日
作物、環境與生物資訊 12:183-197 (2015)
Crop, Environment & Bioinformatics 12:183-197(2015)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng District, Taichung City 41362, Taiwan ROC

malondialdehyde (MDA) than others. Results suggest that CNY1031130 might suffer less oxidative damage under salt stress.
Keywords: Rice, Mutant line, Salt tolerance.

前言

土壤鹽化是世界上普遍存在的嚴重問題之一，尤其是在乾旱、半乾早和熱帶地區，因為這些地區水分蒸發量高，雨水少，易形成鹽土。據估計，全世界約有三分之一的灌溉地和重要的土地在乾旱、半乾早和熱帶地區因為鹽害問題而無法利用(Eckholm 1975)。依照美國農業部(USDA)訂定之標準，土壤之飽和抽出液電導度(electrical conductivity; EC) ≥ 4 dS m^{-1}時，稱為鹽土(saline soil)，通常以含氯化鈉(NaCl)和硫酸鈉(Na_2SO_4)為主。土壤中可交換鈉(exchangeable sodium percentage; ESP) ≥ 15%，土壤酸鹼值 pH > 8.5，含碳酸鈉(Na_2CO_3)與碳酸氫鈉($NaHCO_3$)為主的土壤，則稱為鹼土(sodic soil or alkaline soil)。鹽土與鹼土經常同時存在，可稱為鹽鹼土(USDA 1975)。鹽鹼土大都是自然產生，然而近年來因為氣候變遷、土地耕作及人為不當的灌溉或施用肥料等因素，使得農田土壤日漸鹽鹼化，已成為作物生產的一項限制因子(Munns 2005)。

稻米是全球主要糧食作物，亦是臺灣農業發展不可或缺之重要作物，在生長過程中常受許多生物及非生物逆境影響而使產量降低。其中，鹽害為重要的非生物逆境之一，係因鹽分可經由離子毒性、滲透潛勢及氧化逆境等影響植物的生長。水稻對鹽分極為敏感，尤其在營養生長期的早期和生殖生長期，當遭受鹽害時將可能對水稻造成嚴重減產(Heenan *et al*. 1988)。臺灣目前雖然糧食生產尚不虞匱乏，但臺灣地處亞熱帶地區，為農業易受氣候變遷影響的地帶，加上特殊地形，使得降雨常在空間和時間分佈不均而產生淹水或乾旱的現象(Chen *et al*. 2005)。此外，肥料與農藥的不當施用以及因為經濟開發而超抽地下水，導致臺灣西南部沿海地區發生地層下陷及海水倒灌等問題，均造成土壤的可溶性鹽類含量增加，土壤鹽鹼化日益嚴重(Yeh and Wei 2008)。國內水稻育種迄今雖已育成許多耐抗病蟲害且高產優質的水稻品種，然較少有適合於鹽化土地栽培利用的耐鹽品種育成，因此選育對鹽分逆境具有耐受性的水稻品種為一值得重視之課題。

利用化學誘變產生遺傳變異為獲得耐抗逆境種原的方法之一，其中疊氮化鈉原為一種呼吸作用抑制劑，因可以抑制過氧化酶(peroxidase)的活性，使 DNA 產生錯誤的修補作用，故被廣泛應用在誘變育種中(Konzak *et al*. 1975)。因此，本研究以疊氮化鈉誘變品系為材料來源，分別於幼苗期及最高分蘗期進行鹽分耐受性篩選。另採集鹽分地區的土壤進行盆栽試驗以模擬確認所篩選出來的耐鹽突變品系於鹽化土壤下之生長表現，並進而探討耐鹽品系於鹽分逆境下的可能生理反應，期能作為未來因應氣候變遷衝擊時所需之耐鹽核心種原。

材料與方法

試驗材料

本研究選用對鹽分逆境具耐受性的耐鹽品系嘉農育 1031130 號(CNY1031130) 及其親本對照品種「臺粳 2 號」('TK2')，以及對鹽分逆境敏感的敏感型對照品系 SM332 (又稱 CWY981125)為試驗材料。CNY1031130 係利用 1.5 mM 疊氮化鈉 2 次誘變'TK2'後，於 M_5 世代進行幼苗期三葉齡 200 mM NaCl 鹽分逆境篩選所選出之對鹽分具耐受性的突變系，再以譜系法選拔純化繁殖所得到的穩定耐鹽突變品系。SM332 則係以 1 mM 疊氮化鈉誘變「台農 67 號」後得到香米突變品系嘉農育 911303 號(CNY911303)，再以 100 mM ethylmethane sulfonate (EMS)誘變且於 M_5 世代選育農藝性狀優良單株 1005 株，再於 M_6 世代進行幼苗期三葉齡 150 mM NaCl 溶液的鹽分逆境篩選所選出之鹽分敏感系，並

以譜系法純化繁殖16代以上所得到的穩定鹽分敏感突變品系(Kuo *et al*. 2013)。

耐鹽特性之篩選

'TK2'突變庫耐鹽特性之篩選：將 1500 個 M_5 突變體水稻種子置於培養皿中，先以稀釋 1,000 倍的免賴得粉劑消毒 24 h 後，置於 30℃ 烘箱內浸種(每日換水)發芽後，點播於 50 cm × 60 cm 的 80 孔水耕盤進行水耕栽培。所使用的水耕液係為改良式木村氏 B 培養液配方(Yoshida *et al*. 1976)，先以 0.5 倍水耕液進行栽培，待幼苗生長至一葉齡時更換為 1 倍水耕液，生長至三葉齡時則更換為 1.5 倍水耕液。此時水耕液中同時添加 200 mM NaCl，經處理 10 日後改為正常水耕液，調查存活材料得到 22 個具有耐鹽表現的 M_5 耐鹽株，其中，以編號 39 號的耐鹽株表現最佳，將其以單本植方式移植至田間並收穫自交種子成立品系，即 CNY1031130。

水稻突變品系不同發育時期之耐鹽性等級評估：以耐鹽性品系 CNY1031130 為材料，分別於三葉齡、五葉齡、七葉齡幼苗時期以及最高分蘗期的成株時期進行鹽分逆境處理，並選取親本'TK2'與敏感性品系 SM332 做為對照。其中，不同葉齡的幼苗期係利用前述 80 孔盤進行水耕栽培，先以含 100 mM NaCl 的水耕液處理 2 天，再以含 200 mM NaCl 的水耕液處理至對照組'TK2'的鹽害等級約達 7 級時回復為一般水耕液培養。幼苗期三種不同葉齡階段的試驗處理以逢機完全區集設計(RCBD)排列，二重複，各品系均以 10 株為一重複單位，並於鹽分逆境處理後開始每日進行鹽分耐受性的等級調查。而最高分蘗期的處理，係 2014 年第二期作於行政院農業委員會農業試驗所之嘉義分所的水稻試驗田區進行，田間管理以一般慣行法栽培，四重複，採 RCBD 設計。每一品系 3 行植，每行 25 株，行株距為 30 cm × 15 cm。鹽分逆境處理方式係在水稻最高分蘗期開始至齊穗期止，將鹽水濃縮液利用沉水馬達抽水到鹽水貯存槽，再與淡水稀釋至電導度(electrical conductivity; EC)達 10 dS m^{-1} 後，利用 PVC 管延伸至田間分流灌溉。於灌溉鹽水後，每隔一段時間進行記錄土壤電導度變化，並調查與評估植株的耐鹽等級。

土壤電導度變化係以 SMEC 300 土壤水分/電導度/溫度三合一的傳感器 (SMEC 300 sensor, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA)測定土壤 EC 值，鹽分耐受性的等級則係參考 Jwo *et al*. (2008)修改自 IRRI 於 2000 年所訂定的鹽分傷害分級標準中的水稻標準評估系統 (Standard Evaluation System for Rice; SES)手冊，分為 0 (植株正常生長)、1 (植株葉片捲曲或下位葉黃化) (高耐鹽性)、3 (植株葉片先端乾枯白化) (耐鹽性)、5 (植株葉片約 1/2 乾枯白化) (中耐鹽性)、7 (植株葉片約 2/3 乾枯白化) (感鹽性)及 9 (植株完全乾枯白化) (高感鹽性)等不同傷害等級，等級越高，表示植株受鹽分傷害程度越高。

幼苗期水稻突變品系於不同鹽分濃度逆境下之耐鹽性等級評估：以耐鹽性品系 CNY1031130 為材料，於五葉齡時分別以 150 mM、200 mM、250 mM 與 300 mM 的 NaCl 水耕溶液進行鹽分逆境處理，對照品種(系)為親本'TK2'與敏感性品系 SM332。利用前述 80 孔盤進行不同鹽分濃度逆境下之水耕栽培，150 mM NaCl 處理方式係先以含 75mM NaCl 的低鹽分水耕液處理 2 天，再以含 150 mM NaCl 的水耕液處理至對照組'TK2'的鹽害等級約達 7 級時回復為一般水耕液培養。200 mM NaCl 處理方式亦相同，先以含 100mM NaCl 的低鹽分水耕液處理 2 天，再以含 200 mM NaCl 的水耕液處理至對照組'TK2'的鹽害等級約達 7 級時回復為一般水耕液培養。250 mM 與 300 mM 的 NaCl 處理方式亦為相同方式，先分別以含 125 mM 及 150 mM NaCl 的低鹽分水耕液各處理 2 天，再分別改以含 250 mM 及 300 mM NaCl 的水耕液處理至對照組'TK2'的鹽害等級約達 7 級時

回復為一般水耕液培養。試驗以 RCBD 排列，二重複，各品系均以 10 株為一重複單位，並於鹽分逆境處理後開始每日進行鹽分耐受性的等級調查。

臺南市將軍區鹽化土壤種植試驗

自臺南市將軍區的鹽化農田採取土壤樣品進行秧苗期盆栽種植試驗，參試品種(系) CNY1031130、SM332 與'TK2'於浸種消毒 3 天後，將已發芽的種子以 5 cm 的距離點播於鹽化土壤中，以自來水進行湛水處理，維持水面高於土面約 1 cm。每品系 2 行，每行 6 株，四重複，於種植後 22 天調查每品種(系)之存活率、幼苗高度、根長度、幼苗鮮重、根鮮重、幼苗乾重、根乾重以及綠色葉片數，並於植株間表現出差異的起始點至種植後 20 天進行耐鹽等級調查。另於種植後 22 天以 SMEC 300 sensor 測定土壤 EC 值，此時湛水狀態下鹽化土壤 EC 值約為 2.4 dS m^{-1}。存活率(survival rate, %)：每一重複的每品種(系)有 12 株，故(存活植株數÷12) × 100%即為存活率。幼苗高度(seedling height, cm): 測量自種子至葉尖的長度。根長度(root length, cm): 測量自種子至根尖的長度。幼苗鮮重(seedling fresh weight, g): 植株自土壤中挖起後，測量地上部重量。根鮮重(root fresh weight, g): 植株自土壤中挖起後，先以自來水清洗根部再擦乾，測量地下部重量。幼苗乾重 (seedling dry weight, g): 取出地上部，以 70℃烘乾 72 小時後測量其重量。根乾重 (root dry weight, g): 取出地下部，以 70℃烘乾 72 小時後測量其重量。綠色葉片數(green leaves number, no.): 計算存活植株的綠色完全展開葉片數。

水稻幼苗生理分析

以耐鹽品系 CNY1031130、敏感品系 SM332、對照品種'TK2'及耐鹽性對照品系 Pokkali 為材料，於三葉齡時以含 200 mM NaCl 水耕溶液進行鹽分逆境處理，取樣未處理、處理後 1 天、2 天、3 天、4 天及 5 天的植株地上部材料進行生理分析。所有數據為三重複之試驗結果，並以最小顯著性差異(least signification difference test; LSD)比較各處理平均值間之差異。

脂質過氧化(MDA)分析測定: MDA 含量之測定乃根據 Health and Packer (1968)的方法。取水稻幼苗植株秤重，加入液態氮以組織研磨機 TissueLyser II (Qiagen, Germany)研磨成均質粉末後，再加入 1.8 mL trichloroacetic acid (TCA, 5%, w/v)。然後於 20℃下以 10000× g 離心 5 min，取 1 mL 上清液，加入 4 mL 2- thiobarbituric acid (TBA, 0.5 %, w/v, 溶於 20 % TCA)，置於 95℃水浴槽中反應 30 min。終止反應後於室溫下以 2000× g 離心 10 min，取 1 mL 上清液以分光光度計 (spectrophotometer, Genesys™10 UV, ThermoSpectronic, USA)測定波長 532 nm 和 600 nm 之吸光值(A_{532}及 A_{600})。空白試驗以 1 mL TCA (5 %, w/v)代替萃取液。反應後產物之消光係數為 155 mM^{-1} cm^{-1}。每株鮮重樣品中 MDA 含量(nmol $plant^{-1}$): $(A_{532}-A_{600})$ ÷ 155 (消光係數，mM^{-1} cm^{-1}) × 5 (反應體積，mL) ÷ 1 (cm) × 1.8 (稀釋倍數) × 1000。而每克樣品中 MDA 含量(nmol g^{-1}): $(A_{532}-A_{600})$ ÷ 155 (消光係數，mM^{-1} cm^{-1}) × 5 (反應體積，mL) ÷ 1 (cm) × 2 (稀釋倍數) × 1000 ÷ 樣品鮮重(g)。

輔胺酸(proline)含量之測定: 輔胺酸含量測定乃根據 Bates *et al*. (1973)的方法。取水稻幼苗植株秤重，加入液態氮以組織研磨機 TissueLyser II (Qiagen, German)研磨成均質粉末。加入 5 mL sulfosalicylic acid (3%, w/v)，於室溫下以 3000 rpm 離心 20 min，取 1 mL 上清液加入 1 mL 現配之 ninhydrin (2.5%, 60% acetic acid, 2.4 M phosphoric acid)及 1 mL acetic acid，於 100℃水浴中反應 60 min。冷卻後加入 4 mL 甲苯靜置 10 min，吸取上層甲苯層以分光光度計 (Genesys™10UV, ThermoSpectronic, USA)測定 520 nm 波長之吸光值(A_{520})。空白試驗以

1 mL sulfosalicylic acid 代替萃取液。Proline 含量(μmol g^{-1})計算: A_{520} ÷ 3.24 (消光係數，μmol^{-1} cm^{-1}) × 5 (稀釋倍數) ÷ 鮮重 FW (g)。

葉片葉綠素含量測定: 取水稻幼苗葉片於 5 mL 95% 酒精置於 70℃ 水浴槽中反應 20 min，使葉綠素溶於酒精中。並作 2 次萃取。將 2 次萃取之酒精混合液，取 1 mL 利用分光光度計(Genesys™10UV, ThermoSpectronic, USA)於波長 665 nm 及 649 nm 下測定其吸光值。葉綠素濃度(total chlorophyll，μg Chl mL^{-1})依據公式 6.1 × A_{665} + 20.04 × A_{649} 估算而得。每克樣品中葉綠素含量(mg g^{-1}): 葉綠素濃度(μg Chl mL^{-1}) × 1 mL × 10 (稀釋倍數) ÷ 樣品鮮重(g) ÷ 1000。

統計分析

試驗數據以統計軟體 SAS (Statistical Analysis System, version 7.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)進行變方分析(analysis of variation; ANOVA)，並以 LSD 進行顯著性測驗。

結果與討論

'TK2'突變庫耐鹽特性之篩選

利用'TK2'經疊氮化鈉二次誘變培育之 1500 個突變品系為材料，於水稻幼苗期 3 葉齡時，利用 200 mM NaCl 模擬鹽分逆境處理 10 日後復水，調查存活材料，結果有 22 株呈現 3–5 級之耐鹽性反應，佔總誘變株的比率為 1.47%，顯示以疊氮化鈉處理確可造成變異(Fig. 1)。為確定這 22 個突變品系之鹽分耐受性表現，進一步進行複篩，於秧苗 3 葉齡時先以 100 mM NaCl 處理 2 天後，再以 200 mM NaCl 處理至對照組'TK2'鹽害程度達 7 級時復水，經調查並挑選各突變品系在 3 重複的試驗結果中均達 3 級者。發現以 CNY1031130 突變品系對鹽分耐受性的反應表現較佳 (資料未列出)，此即為獲選的幼苗期高耐鹽突變品系。

由'TK2'突變庫經幼苗期鹽分逆境篩選的結果顯示，經過兩次的疊氮化鈉誘變處理，已誘發水稻耐鹽性產生 1.47%的突變率，此與 Konzak *et al.* (1975)利用疊氮化鈉誘變大麥種子產生葉綠素突變體，Jain (2010)利用 ethyl methane sulphonate (EMS)誘變香蕉莖尖產生抗香蕉黃葉病的突變體，以及 Nagatomi *et al*. (1995)利用 EMS 誘變菊花，獲得 5.2%突變率等的結果相似。Jwo *et al*. (2008)以疊氮化鈉化學誘變水稻「台農 67 號」，並利用 150 mM NaCl 水耕液篩選突變品系，可由 465 個突變品系中篩選出 8 個耐鹽性與感鹽性突變品系，與本研究於幼苗期利用 200 mM NaCl 水耕液篩選，由 1500 個突變體參試材料數量縮減為 22 個的方式相似，可於短時間內大量篩選突變材料，之後再利用複篩選出高鹽分逆境耐受性的突變品系。

水稻 CNY1031130、'TK2'及 SM332 不同發育時期之鹽分耐受性等級評估

植物的鹽分耐受性表現易受環境因素所影響，故為確認耐鹽性品系 CNY1031130 的耐鹽穩定性，分別於三葉齡、五葉齡、七葉齡的幼苗時期以及最高分蘖期的成株時期進行鹽分逆境處理，並以誘變親本'TK2'與敏感性品系 SM332 為對照，每品種(系)以 10 株植

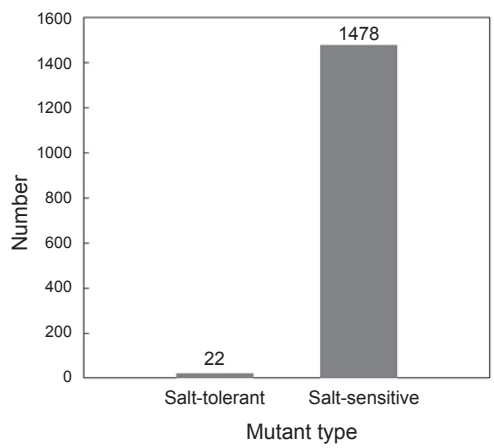


Fig. 1. The number of the salt tolerant and sensitive mutants in the 'TK2' M_5 mutation pool after treatment with 200 mM NaCl.

株表現的耐鹽等級取平均值，進行鹽分逆境與復水後的傷害等級調查，以瞭解耐鹽品系於不同發育時期對鹽分逆境的耐受性表現。結果發現，在三葉齡時期 CNY1031130 在耐鹽等級上的表現於處理後 3 天即可與對照品系出現差異，此時 CNY1031130 植株尚未出現鹽害表徵，然對照品種(系)'TK2'及 SM332 的耐鹽等級則約為 1 級，處理後 6 天除 CNY1031130 仍維持 3 級以下外，其餘 2 個對照品種(系)則已達 5 級以上。儘管之後予以回復恢復正常生長條件，'TK2'及 SM332 的耐鹽等級仍達 7 級以上，但 CNY1031130 仍維持 3 級以下(Fig. 2A 及 Fig. 2D)，顯示 CNY1031130 於三葉齡時期即具有耐鹽性。在五葉齡時期，'TK2'及 SM332 的耐鹽等級在處理後 8 天達 5 級以上，而 CNY1031130 在處理後 9 天仍在 5 級以下(Fig. 2B 及 Fig. 2E)，顯示 CNY1031130 於五葉齡時期仍表現較佳的耐鹽特性。而在七葉齡時期，'TK2'及 SM332 的耐鹽等級在處理後 9 天達 5 級以上，而 CNY1031130 則是在處理後 10 天仍在 3 級以下(Fig. 2C 及 Fig. 2F)。由結果發現隨著葉齡的增加，植株對鹽分的忍受性越好。綜觀各品種(系)在不同葉齡的耐鹽性表現，對

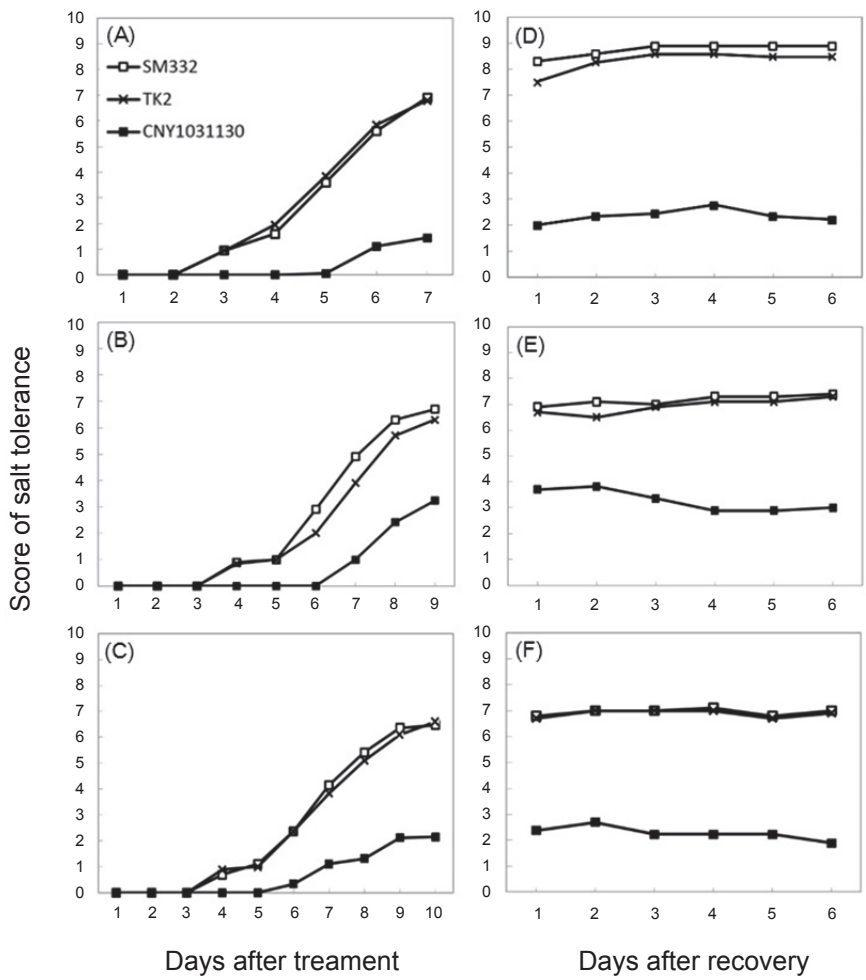


Fig. 2. Comparison of the changes of salt tolerance score among salt tolerant line 'CNY1031130', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2' of rice under different leaf stages (A, B, and C) and recoveries (E, F, and G), respectively. A and D, three-leaf stage; B and E, five-leaf stage; and C and F, seven-leaf stage.

照品種'TK2'與敏感品系 SM332 在三葉齡、五葉齡及七葉齡時，均分別在鹽分逆境處理後 3 天及 4 天即開始出現傷害級別(Fig. 2A、Fig. 2B 及 Fig. 2C)，回復後的鹽分耐受性等級(即傷害級別)在三葉齡與五葉齡均達 7 級以上(Fig. 2E 及 Fig. 2F)，而七葉齡已達 7 級以上，植株幾乎完全乾枯死亡(Fig. 2D)。而耐鹽品系 CNY1031130 的幼苗植株在鹽分逆境處理及回復後，除在五葉齡時鹽分處理後 9 天及回復後 1、2 與 3 天的傷害等級介於 3-4 級外(Fig. 2B 及 Fig. 2E)，其他無論在三葉齡、五葉齡或七葉齡的時期仍大都呈現 3 級以下，且均在鹽分逆境處理 5 天以後才開始呈現傷害級別，顯現極高的鹽分耐受性(Fig. 2)。此與 Jwo *et al*. (2008)進行幼苗期耐鹽篩選，發現大部分的品系在鹽分逆境處理後第 5–7 天發生產生劇烈轉折變化的結果相似。

進一步調查各品種(系)在最高分蘖期對鹽分耐受性的表現，結果發現隨著田間土壤鹽分濃度的增加，在 EC 值 4.6 dS m^{-1} 時已可觀察到僅耐鹽突變品系 CNY1031130 以及對照品種'TK2'的耐鹽等級仍維持在 5 級以下，SM332 的等級已達 7 級以上；到鹽分濃度達 EC 值 5.6 dS m^{-1} 時，則僅剩 CNY1031130 的耐鹽等級仍在 5 級以下，其餘品種(系)則已乾枯死亡，一直到 EC 值至 6.6 dS m^{-1} 時，則全部的參試品種(系)皆乾枯死亡。顯示隨著田間土壤鹽分濃度的增加，不同耐鹽突變品系對鹽分的耐受性差異越明顯，以耐鹽突變品系 CNY1031130 具較高耐鹽性，其耐受性範圍約可到 EC 值 5-6 dSm^{-1} 左右(Table 1)。調查各品種(系)於鹽水灌溉期間的植株耐鹽等級變化，發現在鹽水灌溉後 7 天各品種(系)在鹽分耐受性等級上的表現即有差異。以每品系四重複植株表現的耐鹽等級取平均值，發現到鹽水灌溉後 29 天，除了耐鹽品系 CNY1031130 的鹽分耐受性等級仍維持 3 級，對照品種'TK2'為 4.5 級，而敏感品系 SM332 的等級則已達 6.5 級；到鹽水灌溉後 36 天，除了 CNY1031130 品系外，其餘品種(系)皆達 7 級以上，顯示以 CNY1031130 品系的耐鹽性表現最佳(Fig. 3)。惟至鹽水灌溉後 42 天，包括 CNY1031130 品系在內的所有品種(系)均達 7 級以上，此時田間土壤鹽分濃度為 EC 值 6.6 dS m^{-1}，為較高濃度的鹽分逆境。

利用耐鹽等級方法評估植株的耐鹽性已被廣泛利用，Mohammade *et al*. (2014)以 7 個水稻品系進行的全互交 F_1 組合為材料，利用 SES 等級、苗高、苗乾重和乾重等評估幼苗期(EC 值 12 dS m^{-1})的植株耐鹽性，發現在幼苗期的 F_1 組合，耐鹽等級可分為 1–7 級，顯示具有大的遺傳變異。在本研究中亦利用植株受鹽害傷害的外表特徵來判定耐鹽等級，以瞭解 CNY1031130 的幼苗時期與成株期的耐鹽性，結果發現 CNY1031130 在三葉

Table 1. Comparison of the expression of salt tolerance scores among salt tolerant line 'CNY1031130', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2' of rice in maximum tillering stage under artificial irrigation on saline soil during the second crop season in 2014.

Days after saline *irrigation*	EC (dS m^{-1}) [x]	Salt tolerant line [y]
0	3.4	SM332, CNY1031130, TK2
11	3.7	SM332, CNY1031130, TK2
14	4.1	SM332, CNY1031130, TK2
22	4.6	CNY1031130, TK2
36	5.6	CNY1031130
42	6.6	-
46	6.6	-

[x] EC：Electrical conductivity.

[y] Means the score of salt tolerance is under 5.

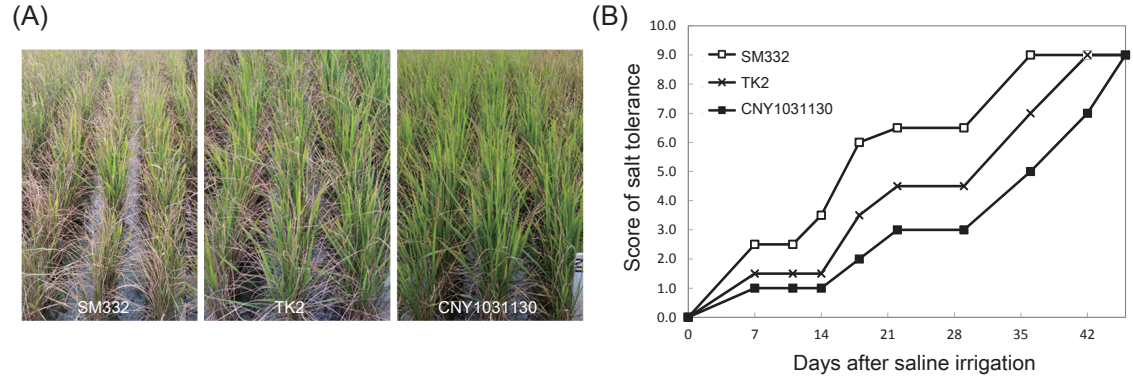


Fig. 3. Comparison of the changes of salt tolerance scores among salt tolerant line 'CNY1031130', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2' of rice in maximum tillering stage under artificial irrigation on saline soil during the second crop season in 2014. Photo was taken days after saline irrigation 29 (A) and the salt tolerance score were recorded in days after saline irrigation 7, 11, 14, 18, 22, 29, 36, 42 and 46 (B), respectively.

齡即具耐鹽性，一直到七葉齡仍顯示具有高度耐鹽性。而在最高分蘖期後的耐鹽性表現，則顯示此品系的鹽分忍受性為 EC 值 5-6 dSm^{-1} 左右，顯示在成株期仍具耐鹽性。Islam and Gregorio (2013)利用水稻標準評估系統(SES)評估各品系在 EC 值 8 dS m^{-1} 的鹽分逆境下之鹽分傷害等級，結果發現 BR23、BRRI dhan40、BRRI dhan41、BRRI dhan53 及 BRRI dhan54 等 5 個品系在 EC 值 8 dS m^{-1} 的鹽分逆境下，不論是幼苗期或生殖生長期的鹽分傷害等級皆有 5 級的耐鹽性(Islam and Gregorio 2013)。本研究亦有相同結果，發現不論在幼苗期或最高分蘖期(EC 值 5.6 dS m^{-1} 時)，CNY1031130 的耐鹽等級皆有 5 級以下，而田間試驗結果顯示其約可忍受 EC 值 6.6 dS m^{-1} 以下的鹽分逆境。

水稻 CNY1031130、'TK2'及 SM332 於不同鹽分濃度逆境下之鹽分耐受性等級評估

將耐鹽品系 CNY1031130、對照品種 'TK2'與鹽分敏感品系 SM332 於五葉齡幼苗期時，分別以 150 mM、200 mM、250 mM 與 300 mM NaCl 水耕溶液進行鹽分逆境處理，瞭解耐鹽品系 CNY1031130 於幼苗期時對鹽分濃度的忍受性。結果發現，在 150 mM NaCl 鹽分逆境處理中，CNY1031130 一直到處理後 10 天鹽分傷害等級才達 1 級以上，復水後的耐鹽等級亦維持在 3 級以下；'TK2'及 SM332 則隨著處理天數的增加，傷害等級亦有上升趨勢。其中，SM332 在處理後 8 天鹽分傷害等級達 7 級以上，儘管後來予以回復，植株仍乾枯死亡；而'TK2'則在處理後 10 天鹽分傷害等級達 7 級以上，到回復後 5 天鹽分傷害等級約達 9 級，植株乾枯死亡(Fig. 4A 及 Fig. 4E)。在 200 mM NaCl 鹽分逆境處理下，'TK2'及 SM332 在處理後 10 天鹽分傷害等級達 7 級以上，CNY1031130 則呈現 5 級。'TK2'及 SM332 一直回復後 5 天耐鹽等級亦表現在 7 級的傷害以上，CNY1031130 則降為 3 級以下(Fig. 4B 及 Fig. 4F)。提高鹽分濃度為 250 mM NaCl 時，CNY1031130、'TK2'及 SM332 隨著處理天數的增加，傷害等級亦有上升趨勢，至處理後 8 天 3 個品種(系)的鹽分耐受性等級皆達 7 級。惟 CNY1031130 於回復後 5 天降為 7 級以下，植株雖仍可存活，但不具高耐鹽性(Fig. 4C 及 Fig. 4G)。到鹽分濃度為 300 mM NaCl 時，CNY1031130 在處理後 6 天，耐鹽等級為 5 級以下，而'TK2'及 SM332 則在 7 級以下，一直到回復後 5 天，CNY1031130 耐鹽等級達 7 級以上，而 TK2 及 SM332 則已達 9 級，全部植株皆乾枯死亡(Fig. 4D 及 Fig. 4H)。

由試驗結果發現，無論 CNY1031130 或‘TK2’及 SM332 的鹽分傷害等級皆隨著處理天數的增加而上升，以 CNY1031130 在 150 mM及200 mM NaCl的鹽分濃度處理下的受傷害程度較輕微，具較高的存活情況，但當鹽分濃度提高到 250 mM 及 300 mM NaCl 處理時，植株則不具耐鹽性。Rahmanzadeh *et al*. (2008)以 0、75 和 150 mM NaCl 進行幼苗期鹽分逆境篩選，調查幼苗乾重、鮮重、莖長和根長等，發現所有的品種皆受到鹽分逆境濃度增加的影響使各調查項目皆呈現降低現象。Abbas *et al*. (2013)分別利用 0、30、60、90、120 和 150 mM NaCl 溶液進行水稻種子發芽及幼苗期耐鹽性篩選試驗，試驗結果發現隨著鹽分濃度的增加，水稻種子的發芽率、莖長、根長及植株乾重皆明顯降低，且不同品系間對鹽分耐受性的耐感差異明顯。由本研究於幼苗期利用不同濃度的氯化

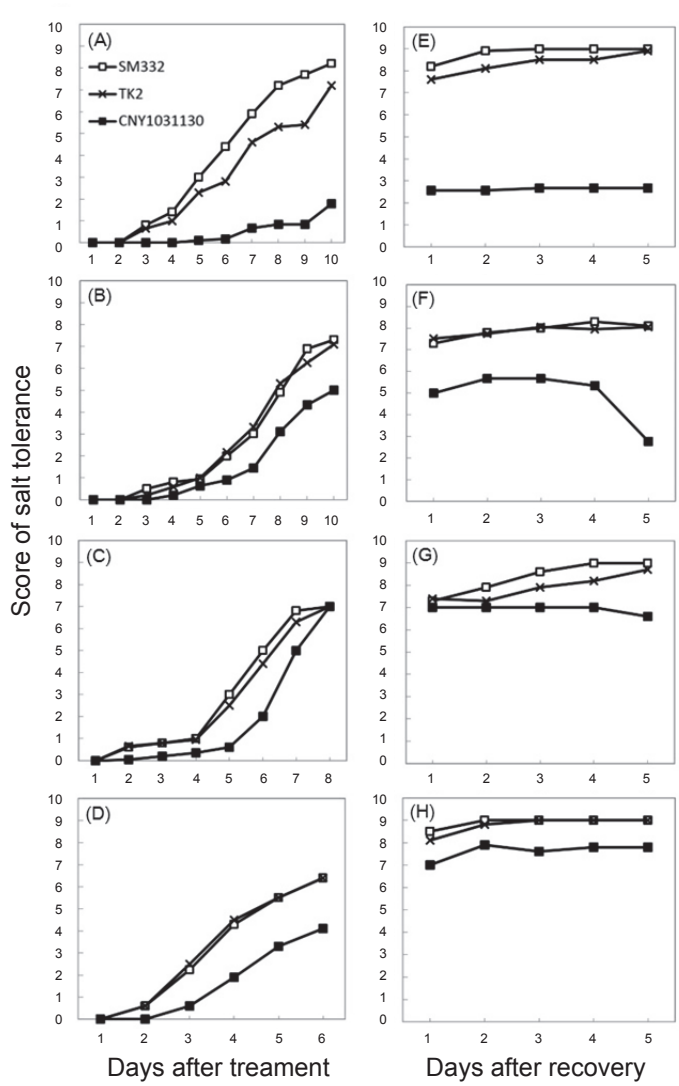


Fig. 4. Comparison of the changes of salt tolerance scores among salt tolerant line ‘CNY1031130’, salt sensitive line ‘SM332’, and control variety ‘TK2’ of rice under different saline concentrations (A, B, C, and D) and recoveries (E, F, G, and H), respectively. A and E are means 150 mM; B and F, 200 mM; C and G, 250 mM; and D and H, 300 mM.

鈉溶液模擬鹽分逆境的結果，亦發現隨著鹽分濃度的增加，植株對鹽分的耐受性明顯降低，且以 CNY1031130 對鹽分的耐受性較對照品種(系)為高。

水稻 CNY1031130、'TK2'及 SM332 種植於鹽化土壤下之生長表現

為瞭解耐鹽品系與敏感品系在含鹽分土壤的逆境下對幼苗生長發育之影響，本試驗挖取臺南市將軍區鹽化農田中的鹽化土壤(EC 值 5.4 dS m^{-1})，以自來水進行湛水處理，則湛水的鹽化土壤 EC 值降為 2.4 dS m^{-1}。將催芽後之稻種移植至鹽化土壤中進行鹽分逆境下秧苗存活率以及生長試驗調查，由試驗結果發現，以 CNY1031130 耐鹽品系有最佳的存活率，可高達 100%，顯著優於敏感品系 SM332 的 22.9%以及其誘變親本'TK2'的 54.2%。顯示在鹽分逆境下會使得對鹽分敏感的品系秧苗死亡情形增加，最終使秧苗存活率降低。另由秧苗生長試驗調查結果發現，CNY1031130 在幼苗高度、根長度、幼苗鮮重、根鮮重、幼苗乾重與根乾重等結果均顯著高於鹽分敏感品系 SM332，但與其誘變親本'TK2'在根長度、幼苗鮮重、根鮮重及幼苗乾重上則無明顯差異。由每單株上所保留綠色葉片的葉片數試驗結果顯示，CNY1031130 每單株上約有 2.7 片顯著最多，'TK2'約有 1.5 片次之，而以 SM332 約有 0.9 片顯著最低(Table 2)。如 Fig. 5A 所示，各品種(系)種植於鹽化土壤下的植株外部形態以 CNY1031130 的幼苗高度明顯高於'TK2'與 SM332，且植株的綠色葉片數亦較多。

Table 2. Comparison of seedling survival rate and line traits among salt tolerant line 'CNY1031130', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2' of rice under saline soil conditions collected from Jiangjun Dist., Tainan City.

Line or variety	Survival rate (%)	Seedling height (cm)	Root Length (cm)	Seedling Fresh weight (g)	Root fresh weight (g)	Seedling dry weight (g)	Root dry weight (g)	Green leaves number (no.)
SM332	22.9 c[z]	17.28±5.43 b	4.20±1.84 b	0.12±0.06 b	0.07±0.02 b	0.04±0.02 b	0.02±0.01 c	0.9±0.51 c
TK2	54.2 b	20.95±1.50 b	5.09±0.90 ab	0.26±0.09 a	0.13±0.05 a	0.06±0.01 ab	0.03±0.01 b	1.5±0.32 b
CNY1031130	100 a	27.99±1.13 a	6.65±0.44 a	0.33±0.03 a	0.15±0.01 a	0.07±0.01 a	0.04±0.01 a	2.7±0.18 a

[z] Means followed by the same letters are not significantly different at 5% level by LSD test.

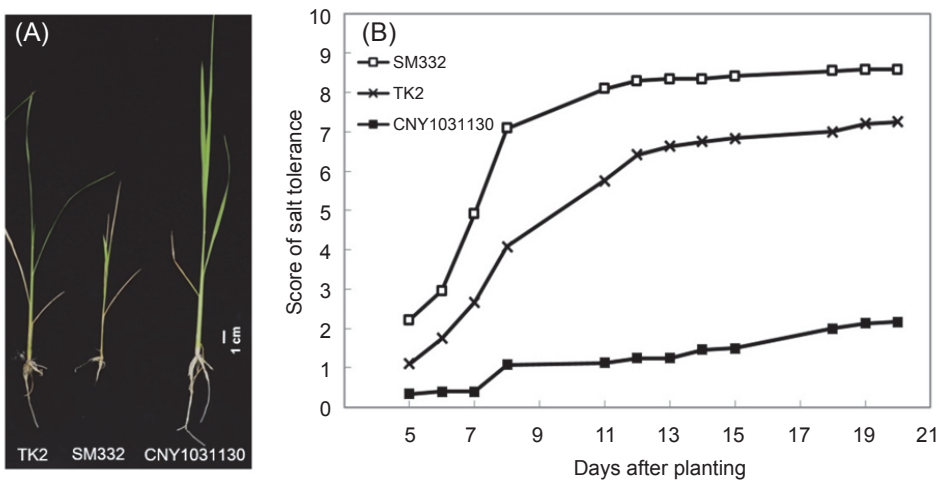


Fig. 5. Comparison of the changes of salt tolerance scores among salt tolerant line 'CNY1031130', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2' of rice under saline soil conditions collected from Jiangjun Dist., Tainan City. Photo was taken 21 days after the start of planting (A) and the salt tolerance score were recorded in days after planting 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 19 and 20 (B), respectively.

綜合植株存活率及生長發育表現結果顯示，耐鹽品系 CNY1031130 能在 EC 值約為 2.4 dS m^{-1} 的鹽化土壤中維持存活率且持續生長，具有較佳的耐鹽性表現 (Table 2)。此外，根據植株外表形態傷害的級別觀察種植於鹽化土壤中的耐鹽等級，以植株表現的耐鹽等級取平均值，發現各品種(系)約於種植後 5 天出現對鹽分逆境的反應差異，表現較輕微的耐鹽品系 CNY1031130 的傷害約在 1 級以下，'TK2'在 1 級以上，而鹽分敏感品系 SM332 已達 2 級以上，隨著種植天數的增加，各品種(系)的鹽分傷害級別都有增加的趨勢。其中，SM332 在種植後 8 天時已達 7 級，而'TK2'則是到種植後 18 天才呈現 7 級反應，CNY1031130 的鹽分傷害級別雖隨著種植天數增加而增加，但傷害級別都不大，即使到種植後 20 天呈維持 3 級以下，顯示其確為一鹽分耐受性佳之耐鹽品系(Fig. 5B)。

依據植物對鹽分耐受性的分級可知，水稻對鹽分逆境的耐受性介於 EC 值 0–8 dS m^{-1} 之間。其中，當 EC 值為 2–4 dS m^{-1} 時，即會對敏感水稻品種造成傷害(Mass 1986)。本研究亦有相同結果，雖然挖取回來的臺南市將軍區鹽化農田中的鹽化土壤 EC 值高達 5.4 dS m^{-1}，然因進行自來水的湛水處理，故鹽化土壤 EC 值降為 2.4 dS m^{-1} 左右，屬於鹽害程度較輕微的土壤。在此鹽分逆境濃度下進行點播，發現以 CNY1031130 的出土存活率最高，達 100%，'TK2'的 54.2%次之，敏感品系 SM332 最低，僅 22.9%。顯示在 EC 值 2.4 dS m^{-1} 的土壤中即對敏感品系造成一定傷害。Shereen *et al*. (2005)利用 0、50 和 75 mM NaCl 進行幼苗期鹽分逆境篩選，結果發現在鹽分處理後 7 天以 75 mM NaCl 處理的植株死亡葉片數較多，且地上部的鮮重明顯降低，而各品系間的鹽害表現不一。而本研究發現當各品種(系)生長在 EC 值 2.4 dS m^{-1} 的鹽化土壤中，以 CNY1031130 的幼苗存活率、幼苗高度、根乾重與綠色葉片數量顯著高於 'TK2' 及 SM332，可知耐鹽品系 CNY1031130 對 EC 值 2.4 dS m^{-1} 的鹽化土壤較其他品種(系)具有較高的鹽分耐受性。

水稻 CNY1031130、'TK2'及 SM332 於鹽分逆境下之生理反應變化

植物可利用不同適應機制如抗氧化系統來減輕鹽害，而 MDA 因是由氧化傷害所引起的脂質過氧化之二級氧化產物，故能由 MDA 的含量結果反映逆境下造成氧化傷害的程度(Heath and Packer 1968)。以耐鹽品系 CNY1031130、敏感品系 SM332、對照品種'TK2'以及耐鹽性對照品種'Pokkali'為材料，於三葉齡時以含 200 mM NaCl 水耕溶液進行鹽分逆境處理，選取未經鹽分逆境處理(第 0 天)、鹽分逆境處理後 1 天、2 天、3 天、4 天及 5 天的植株地上部測定 MDA、proline 及葉綠素含量以瞭解鹽分逆境下各品種(系)的生理反應變化，結果發現氧化逆境指標 MDA 在鹽分逆境下整體含量都有提高，各品種(系)以處理後 4 天的 MDA 含量最高，處理後 5 天則降低。其中，'TK2'與 SM332 在處理後 4 天內的 MDA 含量均隨著處理時間而增加含量，在處理後 4 天達最高量後降低。而 CNY1031130 則在未處理時 MDA 含量約為 20.01 nmol g^{-1} FW，經鹽分逆境處理後 2 天略降為 16.16 nmol g^{-1} FW，在處理後 3 天則開始增加，至處理後 4 天達最高量後降低。耐鹽性對照品系'Pokkali'則是在未處理時 MDA 含量約為 12.44 nmol g^{-1} FW，經鹽分逆境處理後 1 天增加為 21.89 nmol g^{-1} FW，處理後 2 天略降後開始增加，至處理後 4 天達最高量後降低(Fig. 6A)。顯示逆境下會產生過多的過氧化氫，進而產生活化氧族(reactive oxygen species; ROS)攻擊脂質膜系而造成 MDA 的累積。此外，比較各品種(系)間的差異，發現在逆境處理後 2 天，即耐鹽品系與敏感品系的 MDA 含量即有明顯差異，對照品種'TK2'以及敏感對照品系 SM332 的 MDA 含量明顯較耐鹽品系 CNY1031130 與 Pokkali 為高，一直到逆境處理後 5 天皆

有此趨勢(Fig. 6A)，顯示耐鹽品系因產生的MDA 累積較少而具有較高的耐鹽性表現。

Taulavuori *et al*. (2001)指出 MDA 含量為一廣泛用於分析脂質過氧化的方法。而脂質過氧化是一廣泛用於分析逆境下植物膜系受傷程度的指標(Heath and Packer 1968)。Foyer and Shigeoka (2011)的研究指出，當植物處於如鹽分逆境下時，葉綠體及粒腺體的電子傳遞失序，產生許多活化氧族(ROS)，造成蛋白質變性及脂質過氧化等傷害，長期累積下來，就形成氧化損傷(oxidative stress) (Foyer and Shigeoka 2011)。因此，逆境下會產生過多的活化氧族攻擊膜系而造成 MDA 的累積。Amirjani (2010)研究指出，水稻植

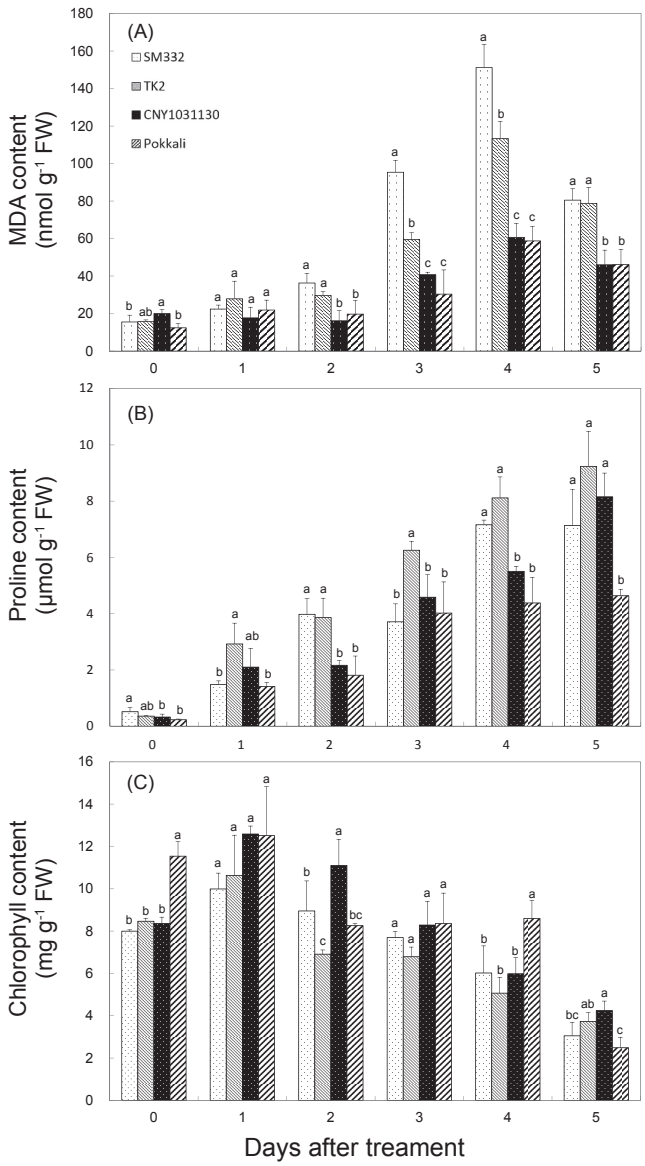


Fig. 6. Changes of 200 mM NaCl treatment on MDA (nmol g^{-1} FW) (A), proline (μmol g^{-1} FW) (B) and chlorophyll (mg g^{-1} FW) (C) contents in the seedling shoot of rice salt tolerant lines 'CNY1031130' and 'Pokkali', salt sensitive line 'SM332', and control variety 'TK2'. The data represent means ± SD, and locations marked with different letters (a to c) are significantly different ($p < 0.05$) by LSD test.

株在 0、25、50、100 和 200 mM NaCl 的鹽分逆境下，除降低幼苗鮮重與乾重外，可溶性碳水化合物和蛋白質等含量亦降低，而過氧化物與脂質過氧化程度則增加，當回復後 24 小時，過氧化物與 MDA 含量皆有降低的情形。本研究發現 CNY1031130 在遭遇鹽分逆境時，所產生的 MDA 累積量較對照品種(系)為低。由於當植物遭受鹽分逆境時，細胞內的傷害反應訊號主要在下游的調控，且會接續產生包括鈣和 ROS 等二次訊息，而過量的 ROS 會引起代謝失衡且因脂質過氧化機制而造成細胞傷害，引起氧化逆境。而在脂質過氧化反應中，MDA 係因膜上的多元不飽和脂肪酸分解及自由基所造成的傷害而形成的第一個產物，故藉由測定 MDA 產物的含量可瞭解細胞膜系功能受到氧化傷害的程度(Sheokand *et al*. 2008)，因此，推測耐鹽品系 CNY1031130 可能係因所遭受的氧化傷害較少而具有較高的鹽分耐受性，此部分未來仍需進一步的酵素分析驗證。

當植物遭受鹽分逆境時，植物細胞會面臨滲透逆境、離子毒害和營養吸收障礙等問題(Patade *et al*. 2008)。而滲透調節(osmotic adjustment)在植物耐鹽機制上為一重要要素，係指通過主動增加溶質，降低滲透勢，提高吸水和保水能力來保持正常膨壓，以維持正常作用的現象，故植物能藉由滲透調節物質來適應滲透逆境。細胞滲透調節物質有兩大類，一為細胞從外界吸收的無機離子，如 K^+、Cl^-、Na^+等，二為細胞內新合成的有機物質，主要為可溶性糖、proline 和 glycinebetaine 等，其中，以 proline 的含量變化最明顯(Delauney and Verma 1993)。為瞭解水稻耐鹽品系 CNY1031130 的幼苗於鹽分逆境下 proline 含量之影響，以‘TK2’及 SM332 作為敏感性對照品種(系)，秈稻‘Pokkali’則作為耐鹽性對照品系，於三葉齡時以含 200 mM NaCl 水耕溶液處理，並於不同時間測定植株地上部的 proline 含量，結果如 Fig. 6B 所示。發現 proline 含量的生成在未處理鹽分逆境時含量最低，當開始逆境處理後，各品種(系)均生成較高的 proline，到了處理後 5 天，則累積較高的 proline。比較各品種系間累積 proline 含量的差異，發現‘Pokkali’的 proline 含量在不同處理天數中大都較其他 3 個品種(系)為低。CNY1031130 的 proline 含量在逆境處理後雖有逐漸累積，但在處理後 5 天時與‘TK2’及 SM332 間無顯著差異。Oh *et al*. (2003)分析水稻耐鹽品種‘Dongjin’和感鹽品種‘Annapurna’兩品種在正常與鹽分逆境下的生理變化，結果發現兩品種的 glycinebetaine 和 proline 的含量在逆境處理後皆較正常處理為高，顯示當植物遭受逆境時會增加 glycinebetaine 和 proline 的含量以對抗不良環境。此與本研究在鹽分逆境下各品種(系)的 proline 含量與未處理鹽分逆境相比，皆有增加現象的結果相似。Kanawapee *et al*. (2012)研究發現，在鹽分逆境下耐鹽品系與極敏感品系相比，耐鹽品系的 proline 含量顯著較高。然本研究發現耐鹽品系 CNY1031130 與敏感品系 SM332 在鹽分逆境處理後 5 天，兩品系的 proline 含量並無顯著差異，因而推測 proline 應不是造成 CNY1031130 對鹽分逆境耐受性較高的主要原因。

葉綠素為植物行光合作用的重要場所，當植物遭受逆境時，細胞膜結構受破壞，因而影響光合作用的電子傳遞鏈無法正常進行，故測定葉綠素含量可得知水稻品系是否具較高的逆境耐受性(Munns 1993)。比較不同耐鹽特性的水稻品種(系)在正常生長狀態下以及 200 mM NaCl 溶液處理後 1 到 5 天的葉片葉綠素含量變化，發現在未處理鹽溶液時，SM322、‘TK2’及 CNY1031130 之葉綠素含量約在 8 mg g^{-1} FW 左右，三品種(系)間無顯著差異性，而以耐鹽品種‘Pokkali’葉綠素含量 11.5 mg g^{-1} FW 顯著最高。與未處理(第 0 天)相比較，發現各品種(系)在處理後第 1 天的葉片葉綠素含量有顯著提高情形，而後隨著處理天數的增加呈現逐漸遞減現象。處

理後 2 天各品種(系)均開始發生顯著降低的情形，以 CNY1031130 的葉綠素含量顯著高於其他品種(系)，處理後 3 天各品種(系)間葉綠素含量均無顯著差異，但在處理後 4 天則以耐鹽品種'Pokkali'葉綠素含量維持最高，至處理後 5 天各品種(系)均降低至約 4 mg g^{-1} FW 以下。當植物生長於長期鹽分逆境下，會使葉片黃化乃至造成葉片乾枯死亡，由本試驗結果可證實除了耐鹽品種'Pokkali'在處理後 4 天仍能持續維持相對較高之葉綠素含量外，其他各品種(系)在鹽分逆境下的葉片葉綠素含量均隨處理日數增加而有降低的情形。此外，比較各品種(系)的葉片葉綠素含量差異，發現在處理後 5 天，耐鹽品種'Pokkali'的葉片葉綠素含量最低，與敏感品系 SM322 間無顯著差異，而耐鹽品系 CNY1031130 的葉片葉綠素含量最高，但與對照品種'TK2'間無顯著差異，顯示耐鹽品系與葉片葉綠素含量之間似無顯著的關係，因此葉綠素含量與耐鹽品系間之關係仍有待進一步試驗釐清。Ali *et al*. (2004)指出，水稻在移植到 EC 值 8.5 dS m^{-1} 的含鹽土壤中生長 90 天後，葉綠素含量、稔實率、有效分蘗數、穗長和產量等表現皆有顯著降低現象，此與本研究中各品種(系)的葉綠素含量在鹽分逆境處理後 5 天，與未處理相比有明顯降低情形相似。Ghosh *et al*. (2011)利用 2 個水稻品種系'Nonabokra'和'Pokkali'，以 200 mM NaCl 濃度的鹽溶液處理，分別於處理後 24、48 和 72 小時評估兩品種在鹽分逆境下的生理生化反應，結果發現，'Pokkali'在 Na^+的高累積和 K^+損失下，造成較多的脂質過氧化、快速損失葉綠素含量，以及極少量的累積 proline 含量，因而對鹽分逆境較'Nonabokra'敏感。此結果可能可以解釋為何在本研究的鹽分逆境處理下，'Pokkali'在處理後 5 天的葉綠素含量最低。另 CNY1031130 與敏感品系相比，於鹽分逆境下亦產生較少的 MDA 累積量以及較高的葉綠素含量，與 Ghosh *et al*. (2011)結果相似，故 CNY1031130 對鹽分逆境的耐受性較 SM332 為佳。

綜合上述結果可知，本研究所篩選出來的 CNY1031130 突變品系，不論幼苗期及成株期，對鹽分逆境皆有一定耐受性，探討其耐鹽之原因發現可能係因其在鹽分逆境下產生的 MDA 含量較低而使植株受到的氧化逆境程度較輕微所致，此部分未來需進一步進行酵素活性及相關基因表現分析加以釐清。

誌謝

本研究承蒙行政院農業委員會科技計畫(104 農科-1.2.3-農-C3)經費補助，特別感謝嘉義農業試驗分所黃哲倫助理研究員在統計分析上之協助。

引用文獻

Abbas MK, AS Ali, HH Hasan, RH Ghal (2013) Salt tolerance study of six cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) during germination and early seedling growth. **J. Agric. Sci.** 5:250–259.

Amirjani MR (2010) Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. **EJBS.** 3:6–16.

Ali Y, Z Aslam, MY Ashraf, GR Tahir (2004) Effect of salinity on chlorophyll concentration, leaf area, yield and yield components of rice genotypes grown under saline environment. **Intl. J. Environ. Sci. Technol.** 3:221–225.

Bate L, RP Waldren, ID Teare (1973) Rapid determination of free proline for water-stess studies. **Plant Soil** 39:205–207.

Chen SH, MH Yao, Y Sun (2005) The impact and strategies of climate change on food security. **Glob. Clim. Change Commun. Mag.** 46:7–13.

Delauney AJ, DPS Verma (1993) Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. **Plant J.** 4:215–223.

Eckholm EP (1975) Salting the earth. **Environ.** 17:9.

Foyer CH, S Shigeoka (2011) Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. **Plant Physiol.** 155:93–100.

Ghosh N, MK Adak, PD Ghosh, S Gupta, DN Sen Gupta, C Mandal (2011) Differential responses of two rice varieties to salt stress. **Plant Biotechnol. Rep.** 5:89–193.

Heath RL, L Packer (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Arch. Biochem. Biophys.** 125:189–198.

Heenan DP, LG Lewin, DW McCaffery (1988) Salinity tolerance in rice varieties at different growth stages. **Aust. J. Exp. Agric.** 28:343–349.

Islam MR, GB Gregorio (2013) Progress of salinity tolerant rice variety development in Bangladesh. **SABRAO J. Breed. Genet.** 45:21–30.

Jain SM (2010) Mutagenesis in crop improvement under the climate change. **Rom. Biotech. Lett.** 15:88–106.

Jwo WS, CG Chern, MH Lai, HM Yen, TH Tseng, HE Yen (2008) Screening technique for salt tolerance in the rice seedling stage. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 57:193–204.

Kanawapee N, J Sanitchon, W Lontom, P. Threerakulpisut (2012) Evaluation of salt tolerance at the seedling stage in rice genotypes by growth performance, ion accumulation, proline and chlorophyll content. **Plant Soil.** 358:235–249.

Konzak CF, M Niknejad, I Wickham, E Donaldson (1975) Mutagenic interaction of sodium azide on mutations induced in barley seeds treated with diethyl sulfate or *N*-methyl-*N'*-nitrosourea. **Mutat. Res.** 30:55–62.

Kuo SC, CW Kuo, YR Lin, YP Wu (2013) Marker-assisted selection of salt tolerance in rice. **J. Taiwan Agric. Res.** 62:137-156.

Mass EV (1986) Salt tolerance of plants. **Appl. Agric. Res.** 1:12–26.

Mohammade R, MS Mendioro, GQ Diaz, GB Gregorio, RK Singh (2014) Genetic analysis of salt tolerance at seedling and reproductive stages in rice (*Oryza sativa*). **Plant Breed.** 133:548–559.

Munns R (1993) Physiological processes limiting plant growth in saline soil: some dogmas and hypothese. **Plant Cell Environ.** 16:15–24.

Munns R (2005) Genes and salt tolerance: bringing them together. **New Phytol.** 167:645–663.

Nagatomi S, A Tanaka, A Kato, H Watanabe, S Tano (1995) Mutation induction on chrysantheu plants regenerated from in vitro cultured explants irradiated with 12C ion beams **JAERI Rev.** 96:50–52.

Oh MJ, HS Chun, CB Lee (2003) Differences in photosynthetic characterization of salt tolerance for two rice (*Oryza sativa*) cultivars. **J. Plant Biol.** 46:17–22.

Patade VY, P Suprasanna, VA Bapat (2008) Effects of salt stress in relation to osmotic adjustment on sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) callus cultures. **Plant Growth Regul.** 55:169–173.

Rahmanzadeh S, K Kazemitabar, S Yazdifar, A Jafroudi (2008) Evaluation of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars response to salinity stress through greenhouse experiment and tissue culture technique. **Asian J. Plant Sci.** 7:207–212.

Sheokand S, A Kumari, V Sawhney (2008) Effect of nitric oxide and putrescine on antioxidative responses under NaCl stress in chickpea plants. **Physiol. Mol. Biol. Plant.** 14:355–362.

Shereen A, S Mumtaz, S Raza, MA Khan, S Solangi (2005) Salinity effects on seedling growth and yield components of different inbred rice line. **Pak. J. Bot.** 37:131–139.

Taulavuori E, EK Hellström, K Taulavuori, K Laine (2001) Comparison of two methods used to analyse lipid peroxidation from *Vaccinium myrtillus* (L.) during snow removal, reacclimation and cold acclimation. **J. Exp. Bot.** 52:2375–2380.

USDA (1975) Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS Agric. Handb. 436. US Govt. Print. Off. Washington, DC. 754pp.

Yeh SY, YT Wei (2008) The study of soil salinization in Kouhu region, Yunlin county. **J. Geogr. Res.** 48:1–24.

Yoshida S, DA Forno, JH Cook, KA Gomez (1976) Laboratory manual for physiological studies of rice. p.61–65. IRRI, Los Banos, Philippines.

－編輯：楊純明