

Saline Alkali Tolerant Rice  
Genetics and Cultivation



**耐盐碱水稻  
遗传与栽培学**

主 编 袁隆平

“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目



山东科学技术出版社  
www.lkj.com.cn

图书在版编目 ( CIP ) 数据

耐盐碱水稻遗传与栽培学 / 袁隆平主编. -- 济南:  
山东科学技术出版社, 2022.8  
ISBN 978-7-5723-1340-0

I. ①耐… II. ①袁… III. ①盐碱地 - 水稻 -  
栽培技术 IV. ①S511

中国版本图书馆CIP数据核字 ( 2022 ) 第133202号

耐盐碱水稻遗传与栽培学

NAIYANJIAN SHUIDAO YICHUAN YU ZAIPEIXUE

责任编辑: 孙雅臻 姬云婷 王 涛

装帧设计: 魏 然

---

主管单位: 山东出版传媒股份有限公司

出 版 者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市市中区舜耕路517号

邮编: 250003 电话: (0531) 82098088

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@sdcbcm.com

发 行 者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市市中区舜耕路517号

邮编: 250003 电话: (0531) 82098067

印 刷 者: 山东彩峰印刷股份有限公司

地址: 潍坊市福寿西街99号

邮编: 261031 电话: (0536) 8216157

---

规格: 16开 ( 184 mm × 260 mm )

印张: 28 字数: 408千

版次: 2022年8月第1版 印次: 2022年8月第1次印刷

定价: 190.00元

# 《耐盐碱水稻遗传与栽培学》

## 编 委 会

主 编 袁隆平

副主编 王春明 戴其根 米铁柱 刘佳音 李继明

编 委 (按姓氏笔画排序)

万吉丽 王 彬 王明明 王春明 王树玉

韦还和 尹晓佳 冯钟慧 刘 凯 刘 聪

刘会芳 刘志霞 刘选明 齐春燕 孙明法

李儒剑 迟文超 张 蛟 张 强 张 瑞

陈英龙 林建中 周振玲 单玉华 柏彦超

侯红燕 耿雷跃 徐大勇 唐珣璠 崔士友

梁正伟 薛佳妮 戴其根

# 序 言

土壤盐碱化，影响农业生产，从而影响人类文明和社会的发展，是古今中外都非常关注的问题。5000 多年前的苏美尔人在干旱无雨的伊拉克南部利用河水灌溉农田并发明了世界上最早的文字——楔形文字，从而创造出一批人类最早的城市国家和灿烂的苏美尔文明。随后，苏美尔文明不断向周围传播并把两河流域北部的亚述地区带入两河流域文明圈，发展成为著名的巴比伦 - 亚述楔形文字文明。然而，到了公元前 539 年，两河流域文明消亡了。持续了 3000 年的两河流域文明灭绝的原因是复杂的，但过度的农业开发引发的土壤盐碱化是一个主要的内因。美国著名亚述学家雅各布森在《古代的盐化地和灌溉农业》一书中论述了两河流域南部苏美尔地区灌溉农业和土地盐碱化的关系，并指出这是苏美尔人过早退出历史舞台的重要原因。中国古代对盐碱土也有深刻的认识，总结出了引水种稻洗盐、淤灌压碱、深翻窝盐、压砂抗碱及生物治盐等技术措施。

盐碱地是我国极为重要的后备耕地资源，挖掘盐碱地潜力、开展盐碱地综合利用对于粮食安全有着特殊意义。随着世界人口的增长、工业化及城镇化的发展，耕地资源在不断减少，不当的耕作和利用引起的土壤盐渍化也降低了土地的生产力，加剧了粮食安全的挑战。如何对包括盐碱地在内的边际土地进行改良和综合利用成为各国普遍关注的问题，通过系统化的综合措施提高盐碱地的利用价值是各国农业领域研究的重要内容。

我国共有 1 亿公顷盐碱地，位居世界第三，其中 0.33 亿公顷具有开发利用潜力，是我国极为重要的后备耕地资源。我国十分重视挖掘盐碱地潜力，开展盐



碱地综合利用。2021 年秋，习近平总书记在视察黄河三角洲农业高新技术示范区的盐碱地改良示范基地时强调，开展盐碱地综合利用对保障国家粮食安全、端牢中国饭碗具有重要战略意义；要加强种质资源、耕地保护和利用等基础性研究，转变育种观念，由治理盐碱地适应作物向选育耐盐碱植物适应盐碱地转变，挖掘盐碱地开发利用潜力。通过盘活这 0.33 亿公顷“沉睡”的土地，实现耕地资源的扩容、提质、增效，对突破现有粮食播种面积的天花板、端牢中国饭碗意义重大。

盐碱地的改良和综合利用意义重大，但要做好并非易事，甚至可以说是世界性的难题。除了工程改良、物理改良和化学改良外，各国都在寻求新的盐碱地改良利用的理念和措施。以色列在内盖夫盐碱荒漠区利用滴灌技术使根系土壤脱盐，在满足作物生长期对水分的需求的同时，保持一定的水量对土壤盐分进行淋洗，减轻盐分对植物根系的伤害，保护作物的产量。另外，以色列研究者们发现，利用咸水灌溉土壤上生产的西红柿，可溶性固体物含量高，口感好，售价高，产值甚至高于普通土壤上生产的西红柿。以袁隆平先生为代表的中国科学家在盐碱土的综合开发和利用方面也做出了卓越贡献，耐盐碱水稻的开发为我国盐碱地的利用注入了新的动力。袁先生生前曾邀请我讨论耐盐碱水稻的工作，共商利用现代生物技术手段加快耐盐碱水稻的研究和培育。

我大学本科学的是土壤与农业化学专业，大二暑期实习我去了位于河北曲周的北京农业大学的试验站，这是以我们的老师石元春、辛德惠教授为代表的第一代农大人开展盐碱地治理的地方。实习中我观察到农作物对土壤盐碱高度敏感，但是盐碱地上也长着不少喜欢盐碱的植物，这让我对植物生理学相关的问题产生了巨大兴趣，在我后来的植物逆境生物学研究和基因编辑技术研究工作中，提高植物的抗旱、耐盐碱能力一直都是重要内容。这本由袁先生担任主编的《耐盐碱水稻遗传与栽培学》，内容非常丰富，可以说是我这些年学习和工作历史的温习，读来倍感亲切。

盐碱地的改良和综合利用是一个复杂的系统性工程，必须多措并举，综合施

策，才能达到“变废为宝”、提高盐碱地的综合利用价值的目的。这本《耐盐碱水稻遗传与栽培学》以重要的粮食作物——水稻为研究对象，从植物耐盐碱特性的分子生物学基础、水稻耐盐碱性遗传分析、水稻耐盐碱性的基因编辑、耐盐碱水稻基因资源挖掘与利用、盐碱地稻田改良与培肥、水稻耐盐碱的生理机制和耐盐碱水稻高产栽培技术等七个方面进行了详细阐述，从传统的强调改造自然转向植物与自然的和谐共生，从治理盐碱地适应作物转向结合选育耐盐碱植物适应土地，是盐碱地改良和综合利用的正确方向。我希望通过对耐盐碱水稻的分子机理研究，利用广泛的耐盐碱野生稻资源，以及包括全基因组筛选、转基因技术、基因编辑技术在内的生物技术手段，培育出超级耐盐碱的水稻新品种，并通过高产栽培技术研究，使这些耐盐碱水稻能够在东北盐碱地、河套盐碱地和滨海盐碱地上广泛种植，提高盐碱地的利用率和生产力，同时为世界同类地区耐盐碱作物的发展起到引领和示范作用，为中国乃至世界粮食安全做出贡献。

我强烈推荐资源环境、遗传育种、植物营养、农学和植物科学等相关专业的学生和研究人员把这本书作为重要的指导性读本，仔细学习，认真研究，共同努力为盐碱地的综合利用贡献力量。

朱健康

2022年6月6日

# 目 录

第 1 章 植物耐盐碱特性的分子生物学基础 .....	001
第 1 节 盐碱地与植物的耐盐碱性 .....	001
一、盐碱地与土壤盐碱度 .....	001
二、盐碱胁迫对植物的伤害 .....	006
三、植物的耐盐碱性 .....	011
第 2 节 植物耐盐碱的分子机制 .....	015
一、渗透调节作用 .....	016
二、离子平衡 .....	019
三、pH 调节 .....	021
四、抗氧化保护 .....	022
五、胞内铵毒害的消除 .....	025
第 3 节 植物盐碱胁迫下的基因表达及信号转导 .....	028
一、植物对盐碱胁迫的感知 .....	028
二、盐碱胁迫调控的基因表达 .....	030
三、SOS 信号途径参与的盐胁迫响应调控 .....	034
四、盐碱胁迫下活性氧代谢及调控机理 .....	037
五、植物激素参与的盐碱胁迫信号调控 .....	041
参考文献 .....	052



第 2 章 水稻耐盐碱性遗传分析	077
第 1 节 水稻耐盐碱性评价指标	077
第 2 节 水稻耐盐碱性的遗传特性	078
一、水稻耐盐性的遗传特性	078
二、水稻耐碱性的遗传特性	079
第 3 节 水稻耐盐碱性状遗传分析方法	080
一、分子标记	080
二、QTL 作图	081
三、突变体的基因定位	084
四、基因芯片 / 微阵列	085
五、全基因组关联分析 (GWAS)	085
第 4 节 水稻耐盐碱相关基因的定位克隆	090
一、水稻耐盐性 QTL 定位	090
二、水稻耐碱性 QTL 定位	098
三、水稻耐盐性基因克隆	100
四、水稻耐碱性基因克隆	102
参考文献	103
第 3 章 水稻耐盐碱性的基因编辑	115
第 1 节 基因编辑工具的发展	115
一、基因编辑工具的基本原理	116
二、基因编辑工具类型	118
第 2 节 基因编辑工具在水稻中的广泛应用与耐盐碱基因编辑	130
一、基因编辑工具在水稻中的广泛应用	130
二、基因编辑在水稻耐盐碱研究中的应用	138
三、基因编辑在水稻耐盐碱研究与应用领域的展望	140

参考文献 .....	142
<b>第 4 章 耐盐碱水稻基因资源挖掘与利用 .....</b>	<b>153</b>
第 1 节 水稻耐盐碱组学研究 .....	153
一、水稻耐盐碱性状的基因组学研究 .....	154
二、水稻耐盐碱性状的转录组学研究 .....	156
三、水稻耐盐碱性状的蛋白质组学研究 .....	159
四、水稻耐盐碱性状代谢组学研究 .....	161
第 2 节 耐盐碱关键调控基因及其调控网络 .....	163
一、耐盐基因和离子平衡 .....	163
二、抗氧化胁迫基因 .....	165
三、抗渗透胁迫基因及其耐盐机制 .....	165
四、植物对盐胁迫信号的响应 .....	167
第 3 节 耐盐碱与农艺性状的相互作用 .....	168
一、耐盐碱和产量 .....	168
二、耐盐碱和品质 .....	169
第 4 节 耐盐碱水稻种质资源的搜集与利用概况 .....	172
一、水稻耐盐碱种质资源的搜集 .....	172
二、水稻耐盐种质资源的利用 .....	172
第 5 节 水稻耐盐新种质的鉴定与创新 .....	175
一、水稻耐盐种质资源的鉴定方法 .....	175
二、耐盐水稻种质鉴定与创新 .....	180
参考文献 .....	195
<b>第 5 章 盐碱地稻田改良与培肥 .....</b>	<b>205</b>
第 1 节 我国盐碱地概况 .....	205



一、盐碱地的定义和分类	205
二、我国盐碱地的分布	206
三、盐碱地的特点	207
第2节 盐碱地稻田土壤培肥与改良的必要性	208
一、水稻对土壤盐碱的耐受能力	208
二、稻作对盐碱地土壤的基本要求	210
三、稻作盐碱地的主要障碍因子	211
第3节 盐碱地改良的技术途径	213
一、盐碱地改良的一般途径	213
二、我国盐碱地改良的理论与实践	214
三、我国盐碱地改良存在的主要问题	215
第4节 稻作盐碱地的有机培肥与改良	216
一、盐碱地有机培肥的原理	217
二、盐碱地改良的有机肥源	218
三、外源有机物对滨海盐碱地稻田的改良效果	219
参考文献	241
<b>第6章 水稻耐盐碱的生理机制</b>	<b>244</b>
第1节 水稻耐盐碱立苗生理	244
一、盐碱地水稻种子萌发成苗的过程	244
二、盐碱地水稻种子萌发过程中的物质代谢	247
第2节 水稻耐盐碱根系形态与生理特性	249
一、盐碱地水稻根系与地上部生长发育的关系	250
二、盐碱胁迫对水稻根系形态生理的影响	251
第3节 水稻耐盐碱光合生理	253
一、盐碱胁迫对水稻抗氧化酶系统的影响	253
二、水稻对盐碱胁迫的光合生理反应	258

第4节 水稻的耐盐碱营养生理 .....	264
一、水稻的营养特性 .....	264
二、盐碱地水稻的营养吸收与利用 .....	270
第5节 水稻耐盐碱产量品质形成生理 .....	272
一、水稻生长发育对盐碱胁迫的响应 .....	272
二、盐碱胁迫对水稻产量形成的影响 .....	274
三、盐碱胁迫对稻米品质形成的影响 .....	280
参考文献 .....	284
<b>第7章 耐盐碱水稻高产栽培技术</b> .....	<b>296</b>
第1节 东北盐碱地水稻栽培概述 .....	296
一、东北平原盐碱地资源及其治理与利用建议 .....	297
二、东北盐碱地脱盐降碱关键技术 .....	304
三、东北耐盐碱水稻高产栽培关键技术 .....	309
第2节 河套盐碱地耐盐水稻高产栽培技术 .....	334
一、河套平原盐渍化土壤资源概况 .....	334
二、河套盐碱地脱盐降碱关键技术 .....	336
三、河套（宁夏平原）耐盐碱水稻高产栽培关键技术研究与实践 .....	355
第3节 滨海盐碱地耐盐水稻高产栽培技术 .....	379
一、中国滨海盐碱地资源概况 .....	379
二、滨海盐土脱盐关键技术 .....	382
三、滨海盐碱地耐盐碱水稻高产栽培关键技术 .....	396
参考文献 .....	417

# 第 1 章 植物耐盐碱特性的分子生物学基础

## 第 1 节 盐碱地与植物的耐盐碱性

盐碱地是指由盐成土构成，土壤所含盐分影响到作物正常生长的土地。盐碱地的形成是自然与人为双重因素综合作用的结果。土壤盐碱化严重威胁作物的生长发育和现代农业的可持续发展，已经成为全球农业生产的头号威胁（Flowers et al, 2015; Zhang et al, 2020）。世界超过 1/3 的土地正在遭受不同程度的土壤盐碱化威胁，由于全球气候变暖造成的海平面上升和不合理灌溉，土壤盐碱化范围不断扩大，盐碱化程度不断加深（Rengasamy, 2006）。目前绝大部分的作物耐盐碱能力都比较差，在土壤盐碱浓度过高时无法正常地完成生长发育，造成严重的减产甚至绝收，严重威胁着全球的粮食安全（Munns, 2015）。为了保证粮食安全，培育耐盐作物品种刻不容缓，为了实现这一目标，必须深入解析盐碱胁迫造成植物伤害以及植物应对盐碱胁迫的分子机制。

### 一、盐碱地与土壤盐碱度

#### （一）国内外盐碱地现状

土壤盐碱化是限制全球农作物生长和生产的主要非生物限制因素之一。盐碱地在全球分布广泛，从寒带、温带到热带的各个地区，从美洲、欧洲、亚洲到澳洲，到处都有大量含盐、干燥、板结、荒芜的盐碱地，甚至冲积平原、灌溉区域也有分布（Munns et al, 2008）。据报道，全球盐碱地面积达到 9.54 亿  $\text{hm}^2$ （表 1-1），



还有更多的土地受到土壤盐碱化的威胁，尤其在干旱和半干旱地区，土壤盐碱化威胁尤其严重，并且每年以 100 万 ~ 150 万  $\text{hm}^2$  的速度增加 (Munns et al, 2008)。我国现有盐碱地 0.99 亿  $\text{hm}^2$ ，约占全球盐碱地面积的 1/10，位居世界第三位 (表 1-2) (云雪雪等, 2020)。全球气候变暖带来的一系列气候问题，再加上不合理灌溉施肥等人为因素，导致我国乃至全球的盐碱地面积正在逐年增加。有研究预测到 2050 年全球盐碱耕地的比例会超过 50%，如果继续放任不管或者处置不当，会严重威胁全球的粮食安全。

表 1-1 盐碱地在全球各大区域的分布 (Munns et al, 2008)

地区	面积 (万 $\text{hm}^2$ )	比率 (%)
北美洲	1 575.5	1.65
墨西哥和中美洲	196.5	0.21
南美洲	12 916.3	13.53
非洲	8 053.8	8.43
南亚	8 760.8	9.17
东亚和中亚	21 168.6	22.17
东南亚	1 998.3	2.09
澳大利亚和周边地区	35 733.0	37.42
欧洲	5 080.4	5.32
合计	95 483.2	100

表 1-2 盐碱地在全球各国或地区 (部分) 的分布 (Munns et al, 2008)

国家或地区	面积 (万 $\text{hm}^2$ )	比率 (%)
澳大利亚	35 724.0	37
苏联	17 072.0	18
中国	9 913.3	10
印度尼西亚	1 321.3	1.4
巴基斯坦	1 045.6	1.1

(续表)

国家或地区	面积 (万 $\text{hm}^2$ )	比率 (%)
印度	700.0	0.7
伊朗	672.6	0.68
沙特阿拉伯	600.2	0.6
蒙古	407.0	0.4
马来西亚	304.0	0.3
合计	67 760.0	—

我国盐碱地主要分布在我国东北地区、西北干旱地区、半干旱地区中的低洼地、东部沿海平原地区以及黄淮海平原地区(郝文凤等, 2020), 主要分为滨海湿润-半湿润海水浸渍盐渍区、东北半湿润-半干旱草原-草甸盐渍区、黄淮海冲积平原半湿润-半干旱旱作-草甸盐渍区、内蒙古高原干旱-半荒漠草原盐渍区、黄河中上游干旱-半荒漠盐渍区、甘肃和新疆荒漠盐渍区、青海和新疆极端干旱荒漠盐渍区及西藏高寒荒漠盐渍区等(肖柏, 2011)。盐碱土包括盐土和碱土两种, 盐土土壤盐分以高浓度的 $\text{NaCl}$ 为主, 而碱土主要以 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{NaHCO}_3$ 为主, 二者常常相互依存而又相互影响(李芳兰等, 2021)。近年来, 随着研究的不断深入, 人们对于盐土和碱土的区分更加清晰, 碱胁迫比盐胁迫的危害更大。内陆盐碱地主要分布在新疆、青海、甘肃和内蒙古, 此类盐碱地主要为硫酸盐盐碱地, 部分为氯化物盐碱地, 盐分含量在1%~4%, 形成的主要原因是气候干燥等使得水分蒸发量大, 大量可溶性盐被留在土壤表层增加了土壤的含盐量。冲积平原盐碱地主要分布在松辽平原、三江平原和黄淮海平原, 地下水水位上升使得水中盐分运动到土壤表层, 使得土壤盐碱化, 此部分地区的盐碱地主要为碳酸盐型盐碱地。滨海盐碱地主要分布在江苏、山东、河北等滨海地区, 极端气候造成的海平面上升和海水倒灌是这些地区盐碱地形成的主要原因, 这些地区盐碱地中的盐分主要是氯化物(毛庆莲等, 2020)。此外, 人类不合理的灌溉、化肥过度使用等原因, 破坏了土壤结构和自我修复能力, 造成次生盐碱化,



加剧了土壤盐碱化进程（张强等, 2018）。

盐碱地被认为是重要的后备土地资源，被誉为“希望的田野”，盐碱地的改良和治理一直以来都备受关注。人类对盐碱地的认识很早，公元前 2400 年，古巴比伦人就对盐碱地有了详细的记录（拱玉书, 2002）。我国古代典籍《尚书·禹贡》就明确记载：“海岱惟青州。嵎夷既略，淮、淄其道。厥土白坟，海滨广斥。厥田惟上下，厥赋中上。……”其中所提到的“斥”就是指盐碱地（朱祖义等, 2005）。盐碱地的治理和改良一直是一个世界性的难题，许多国家和地区投入了大量的人力、物力和财力发展治理盐碱地的措施并取得了良好的效果。例如，美国在转基因技术改良耐盐作物、新型高聚物盐碱土壤微生物修复肥料等方面取得了重大的进展（云雪雪等, 2020）；澳大利亚科学家在耐盐碱小麦育种、生物炭作为土壤改良剂治理盐碱地和微生物改良盐碱地等方面取得了一定的成果（马晨等, 2010）；印度通杂交筛选培育出了水稻耐盐品种和耐盐菌株，在生物改良盐碱地方面取得了良好的成果（孔旭晖等, 1992; Ajay, 2018）；埃及在极端栖息地筛选分离出新的嗜碱的菌株，并将其作为生物肥料改良盐碱地（Minhas et al, 2019）。在盐碱地的治理和改良方面，我国数千年来也在不断尝试，将盐碱地变废为宝。以我国主要盐碱地分布地区之一的黄淮海地区为例，全区耕地面积超过 2 240 万  $\text{hm}^2$ ，其中盐碱地面积约为 333 万  $\text{hm}^2$ ，占全国盐碱耕地的 50%（毛庆莲等, 2020），其农耕和盐碱地治理历史均很悠久，积累了丰富的盐碱地治理经验。例如，在先秦到宋代时期，利用淤灌和引种种稻等方法对漳河、渭河及黄河两岸的盐碱地进行了治理，取得了良好的治理效果（宋静茹等, 2017）；唐宋时期，采用修堰挡潮等方法治理滨海盐碱地；元明清时期，采用屯垦种稻、种稻洗盐等农业措施对京津地区滨海盐碱地进行改良，取得了不错的效果（毛庆莲等, 2020）。近年来，我国在盐碱地治理的工程措施、生物措施和化学措施等土壤改良利用技术方面取得了很重要的成果，其中盐碱地开发种稻是盐碱地改良和利用中最为有效的措施之一（许盼云等, 2020）。水稻作为沿海滩涂和盐碱土改良的首

选粮食作物，“以稻治碱，以稻治涝”是盐碱地区广大农民发家致富的重要途径（王才林等，2019）。我国仅吉林一省就有超过 26.7 万  $\text{hm}^2$  的盐碱地水田，占到其水田面积的 1/3，说明盐碱地具有巨大的开发利用前景（李景鹏等，2020）。种植水稻不仅可以淋溶土壤中的可溶性盐分，还可以恢复或者增大湿地资源，具备生态涵养的功能，以种促改，最后达到治理盐碱地的目的（张国栋等，2019）。然而，水稻并不耐盐碱，盐碱环境会严重影响水稻的生产，虽然现在已有部分耐盐水稻品种发现，但其耐盐碱程度远未达到可在盐碱地直接种植的水平（魏征等，2019）。因此，因地制宜地开发利用各种治理措施以改良、开发和利用盐碱地，同时加速培育新的可直接在盐碱地栽培的耐盐碱水稻品种，对于保护我国的粮食安全至关重要。

## （二）土壤盐碱度

盐碱地是由盐成土构成的土地。盐成土是指在土体深度范围内具有盐积层（salic horizon）或碱积层（alkalic horizon）的一类土壤，通常划分为盐土和碱土两类。为了区分盐成土，国际上通常根据土壤的积盐量、电导率（EC）、碱化度或交换性  $\text{Na}^+$  含量（ESP）和 pH 等指标来划分盐土和碱土。例如，通常将土壤表层积盐量在 6 g/kg 或 10 g/kg 以上的土壤定为盐土，将土壤 ESP 在 20% 以上的土壤定为碱土（龚子同，2014）。参比国际上划分盐积层和碱积层的指标，龚子同等（1999）结合我国土壤状况，制定了以下确定盐积层和碱积层的诊断指标：

①盐积层：在冷水中溶解度大于石膏的易溶性盐富集的土层。其特征如下：厚度至少 15 cm；含盐量，干旱土或干旱地区盐成土中不小于 20 g/kg（或 1:1 水土比提取液的  $\text{EC} \geq 30 \text{ dS/m}$ ），其他地区盐成土中不小于 10 g/kg（或 1:1 水土比提取液的  $\text{EC} \geq 15 \text{ dS/m}$ ）；含盐量（g/kg）与厚度（cm）的乘积  $\geq 600$ ，或 EC 与厚度（cm）的乘积  $\geq 900$ 。

②碱积层：为一交换性钠含量高的特殊淀积黏化层。其除了具有黏化层的典型特征外，还具有以下特性：呈柱状或棱柱状结构，若呈块状结构则应有来自淋



溶层的舌状延伸物伸入该层并达到 2.5 cm 或更深；在上部 40 cm 厚度以内的某一亚层中  $ESP \geq 30\%$ ， $pH \geq 9.0$ ，表层土壤含盐量  $< 5 \text{ g/kg}$ 。

另外，有一种更为直观的区分盐碱地的指标：当土壤的  $EC > 4 \text{ dS/m}$ （相当于  $44 \text{ mM NaCl}$ ）时，土壤即被称为盐碱地；当土壤中  $EC > 15 \text{ dS/m}$ （相当于  $165 \text{ mM NaCl}$ ）时为重度盐碱地（任鹏飞等，2019）。根据土壤  $EC$ 、 $ESP$  和  $pH$  等 3 项指标的差异，又可以将盐碱地分为中性盐盐碱地、碱性盐碱地和混合盐碱地：中性盐盐碱地的  $EC > 4$ ， $pH < 8.5$ ， $ESP < 15$ ；碱性盐碱地中  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  含量很高，使得土壤  $EC < 4$ ， $pH > 8.5$ ， $ESP > 15$ ；混合盐碱地兼具以上 2 种盐碱地的特征，其对植物的伤害更大，更加不利于植物生长（楚乐乐等，2019）。

## 二、盐碱胁迫对植物的伤害

土壤中盐分过多或  $pH$  过高，危害植物的生长和发育，称为盐碱胁迫。盐碱胁迫威胁着植物整个生长发育过程，使得植物生长发育缓慢，组织和器官的发育受到影响，特别是在生殖生长时期，盐碱胁迫会使得植物育性下降，结实率下降，直接影响作物产量（杨少辉等，2006）。盐碱胁迫对植物造成的危害主要包括渗透胁迫、离子胁迫以及高盐引起的营养缺陷、氧化胁迫、胞内氨毒害等一系列的次生胁迫（Zhu et al, 2001）。这些胁迫使得植物生长发育和能量代谢受到抑制，光合作用下降，能耗增加，最终加速植物早衰甚至死亡。

### （一）渗透胁迫

植物在盐碱环境中，土壤含有较多的盐离子使得土壤渗透势下降，而植物细胞的渗透势较高，造成细胞内渗透势高于胞外，引起植物根系吸水困难，水分利用不足，从而对植物产生渗透胁迫，造成生理干旱，植物萎蔫，严重时死亡（陈万超，2011）。一般来说，土壤中的盐浓度足以使土壤水势显著降低（降低  $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ），即被认为引起渗透胁迫。其实，很多土壤中的盐分足够高，其水势的降低远远超过  $0.1 \text{ MPa}$ （赵福庚等，2004）。渗透胁迫不仅存在于盐碱