

利用盐生植物发展“盐湖农业”研究进展

孔凡晶, 王现洁, 王利伟

中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要: 由于人口增长和全球气候变暖, 次生土壤盐碱化日趋严重, 淡水资源缺乏, 使得人类粮食和食品供给面临严峻挑战。“盐湖农业”为解决这一问题提供了一种新的思路。本文评述了盐生植物在农业上的应用国内外研究进展, 重点综述了盐生植物作为食物、饲料、工业原料等方面的研究。盐生植物生长环境比较恶劣, 一些盐生植物为应对逆境环境而合成出丰富的次生代谢物, 这些代谢物对预防疾病和促进健康大有益处, 因此近年来市场对盐生植物的需求显著增加。我国盐湖资源丰富, 利用盐生植物发展盐湖农业有得天独厚的条件, 具有广阔的应用前景, 本文最后提出了在我国发展盐湖农业的几点建议。

关键词: 盐湖农业; 耐盐植物; 咸水资源; 盐碱地; 盐沼带; 盐生植物

中图分类号: Q949.9 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.073101

Research Progress of Using Halophytes to Develop “Salt Lake Agriculture”

KONG Fanjing, WANG Xianjie, WANG Liwei

MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Global food supply faces major challenges due to population growth, global warming, secondary salinization of soils, and scarcity of freshwater resources. “Salt lake agriculture” offers a novel solution to this problem by using salt tolerant plants and animals and saline water to develop agriculture. This article reviews the research progress on halophytes in agriculture, focusing on halophytes as food, feed, and industrial raw materials. As halophytes contain high amounts of health-promoting secondary metabolites, new market demand for such crops has emerged. Salt lakes are abundant in China, and making the development of salt lake agriculture using salt-tolerant crops favorable. Based on the characteristics of China’s salt lake and saltwater resources, proposals for the development of salt lake agriculture have been put forward.

Key words: salt lake agriculture; salt-tolerant plants; saline water resources; saline land; salina zone; halophytes

地球淡水约占其总水量的 2.5%, 而大约三分之二的淡水被固定在极地冰盖和高山冰川中 (Gleick, 2009)。因此, 人类的生产生活可利用的淡水资源越来越匮乏。由于农业用地的过度灌溉, 使土壤盐碱化问题越来越严重, 受影响地区的范围大约从 3.40 亿到 9.5 亿公顷 (Flowers et al., 1995)。联合国粮食和农业组织 (FAO) 农业用水稀缺性全球框架网站 (WASAG) 数据显示, 目前超过 4.24 亿公顷的表土 (0~30 cm) 和 8.33 亿公顷底土 (30~100 cm) 受到盐的影响 (Food and Agriculture Organization of the

United Nations, 2024)。从 1980 年到 2018 年, 全球估计 5.90 亿公顷的土地受到土壤盐碱化影响 (Hassani et al., 2020)。

面对淡水资源短缺和土地盐碱化问题, 人们做出了许多努力来改进作物品种, 以便更好地利用盐碱地和各类水资源。盐湖在世界范围内广泛存在, 是内陆重要的生态系统, 占总体水量的 44% (Saccò et al., 2021)。早在 20 世纪 80 年代初, 郑绵平在西藏盐湖考察中, 发现了一种极端耐盐的杜氏盐藻聚集体, 含有丰富的胡萝卜素, 具有很高的营养价值,

本文由中国工程院咨询项目 (编号: 2014-ZCQ-06) 和国家自然科学基金项目 (编号: L1422036) 联合资助。

收稿日期: 2024-05-25; 改回日期: 2024-07-23; 网络首发日期: 2024-08-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 孔凡晶, 男, 1966 年生。博士, 研究员。长期从事盐湖生物资源调查评价及天体生物学研究。

E-mail: kongjie69@hotmail.com。

可以作为一种新型食品或工业原料(郑绵平等, 1985)。这一发现促使郑绵平从新的角度思考盐湖学方面的相关研究, 盐湖不仅有无机矿产, 还可以作为一种新型的“农田”, 生产高蛋白食品和保健品。1994 年, 郑绵平提出了“盐湖农业”的概念, 得到钱学森的充分肯定, 并来信表达了一些自己的观点和建议: “盐湖农业是不同于一般意义的农业, 它是利用盐湖生态环境及日光, 通过生物生产商品, 是农、工、贸与现代科技相结合的知识密集型农业”。“盐湖农业是 21 世纪的产业”(钱学森给郑绵平通信, 未发表)。在以后的学术生涯中, 郑绵平多次撰文对“盐湖农业”进行推动及完善, 并发表了“论盐湖农业”(郑绵平, 1995)、“盐湖农业与盐碱农业”(郑绵平, 2014)等文, 提出遵循盐碱水土自然形成规律, 就地取材, 利用盐生生物来适应盐碱环境, 培植适应盐碱地的耐盐和嗜盐品种, 发展一种新型的“盐湖农业”生产。近年来, 盐湖农业课题组在国家自然科学基金项目、中国工程院咨询项目以及地质调查项目等资助下, 开展了盐湖农业理论及实践探索, 取得了一些新的认识和成果(Wang et al., 2018; 孔凡晶等, 2019)。我国盐湖数量多, 水化学类型多样, 主要分布在西藏、青海、新疆、内蒙古等干旱、半干旱地区, 耐盐和盐生植物在盐沼带的应用, 对发展盐湖农业具有重要的意义。本文就国内外有关盐生植物在农业方面的研究做一回顾与

展望, 为在盐沼带充分利用盐生植物这一宝贵资源提供参考。

1 国内外盐生植物在农业中的应用研究进展

耐盐植物(salt-tolerant plants)一般是指在 80 mM 盐度以上的土壤能够完成生命史的植物; 其中, 盐生植物(halophytes)则是指能够在盐度超过 200 mM 的土壤完成生命史的植物(Flowers et al., 2008; Santos et al., 2016)。目前, 耐盐植物和盐生植物资料可以查阅网站 eHALOPH(eHALOPH, 2024)。Aronson 在 1989 年, 收集了 1 560 余种耐盐和盐生植物(Aronson et al., 1989)。该网站是在这些数据资料基础上建立起来的一个开放的网络平台, 不仅可以查阅有关耐盐和盐生植物类型、生命方式、生态型、最大耐盐度、有无盐腺、光合途径(C3/C4)、抗氧化剂、次生代谢、可溶性溶质、生境、经济用途、文献发表等数据, 还可以在网站发布新发现的盐生植物(Santos et al., 2016)。我们在网站盐生植物数据中, 共筛选出 1 365 种有经济用途的耐盐生物, 其中盐生植物 918 种, 主要用途是医药, 其次是饲料、传统医药、食品和饮料、燃料、薪材和生物能源; 根据耐盐植物和盐生植物所含有的种数进行排序, 排名前 20 的植物科见表 1(Garcia-Caparrros et al., 2023)。我国的盐生植物有 400 余种, 约占全世界盐生植物

表 1 植物种数排名前 20 的耐盐植物和盐生植物
Table 1 Ranking 20 salt-tolerant plant and halophyte families

含有植物种数最多的耐盐植物排序		含有植物种数最多的盐生植物排序	
1	苋科(Amaranthaceae)	1	苋科(Amaranthaceae)
2	禾本科(Poaceae)	2	禾本科(Poaceae)
3	豆科(Fabaceae)	3	豆科(Fabaceae)
4	蓝雪科(Plumbaginaceae)	4	蓝雪科(Plumbaginaceae)
5	菊科(Asteraceae)	5	大叶藻科(Zosteraceae)
6	莎草科(Cyperaceae)	6	菊科(Asteraceae)
7	柽柳科(Tamaricaceae)	7	水鳖科(Hydrocharitaceae)
8	水鳖科(Hydrocharitaceae)	8	红树科(Rhizophoraceae)
9	桃金娘科(Myrtaceae)	9	丝粉藻科(Cymodoceaceae)
10	番杏科(Aizoaceae)	10	桃金娘科(Myrtaceae)
11	大叶藻科(Zosteraceae)	11	爵床科(Acanthaceae)
12	十字花科(Brassicaceae)	12	番杏科(Aizoaceae)
13	红树科(Rhizophoraceae)	13	莎草科(Cyperaceae)
14	茄科(Solanaceae)	14	十字花科(Brassicaceae)
15	丝粉藻科(Cymodoceaceae)	15	柽柳科(Tamaricaceae)
16	锦葵科(Malvaceae)	16	锦葵科(Malvaceae)
17	爵床科(Acanthaceae)	17	海神草科(Posidoniaceae)
18	伞形科(Apiaceae)	18	木麻黄科(Casuarinaceae)
19	棕榈科(Arecaceae)	19	千屈菜科(Lythraceae)
20	蒺藜科(Zygophyllaceae)	20	茄科(Solanaceae)

数量的四分之一(赵可夫等, 1999, 2001, 2002)。本文重点就耐盐植物及盐生植物在食物、饲料及工业能源等方面的应用进行评述。

1.1 新一代盐生植物——食物和特色蔬菜

由于盐生植物生长环境比较恶劣, 一些盐生植物种类以其具有合成丰富的次生代谢物的能力而闻名。次生代谢物包括单糖、复合糖、氨基酸、季铵化合物、多元醇和抗氧化剂, 如多酚、 β -胡萝卜素、抗坏血酸和脲类(Parvaiz et al., 2008; Ventura et al., 2013a)。这些代谢物具有多种功能, 如作为渗透调节物质和抗氧化剂等(Hasegawa et al., 2000)。渗透调节物质可以用于功能性食品, 具有预防疾病和促进健康的益处(Stuchlik et al., 2002; Ksouri et al., 2012; Buhmann et al., 2013), 能够促进具有高营养潜力的盐生植物有更多的市场机会。一些盐生植物产品的消费水平迅速增长, 如藜麦(Panta et al., 2014)在保健食品方面有广阔的市场需求。

藜麦在南美有着悠久的种植历史, 有些品种能够抵抗海水的盐度(大约 40 mM)。由于藜麦不仅耐受高盐度, 而且对其他非生物胁迫(干旱、霜冻和风)也具有非常高的耐受性。藜麦种子具有特殊营养品质, 富含维生素、矿物质、必需氨基酸和脂肪酸, 使这种“古老作物”在西方饮食中备受关注; 更被认为其为全球粮食安全做出了重要贡献(Adolf et al., 2013)。2014 年, 藜麦产业在我国青海省柴达木盆地萌芽, 经过近十年发展, 如今柴达木地区藜麦产业已发展壮大。根据中国产业研究院发布的“2022—2027 年中国藜麦行业市场全景调研及投资价值评估研究报告”估算, 2022 年, 我国藜麦总产量或达到 2.36 万吨。

海茴香(*Crithmum maritimum*)、马齿苋(*Portulaca oleracea*)、盐角草(*Salicornia* spp.)和紫菀(*Aster tripolium*)等一些盐生植物已经被人类食用了几个世纪, 至今仍然在欧洲沿海盐沼和内陆盐田采集食用(Franke, 1982; Wagenvoort et al., 1989; Davy et al., 2001; Simopoulos, 2004; Tardio et al., 2006)。其中几种盐生植物, 如盐角草(*Salicornia* spp.)和紫菀(*Aster tripolium*), 已经作为海菜和沙拉作物在欧洲市场上销售, 而且价格较高(Boer, 2006)。

高度耐盐的紫菀被认为是一种潜在的盐生经济作物, 已经在荷兰、比利时和葡萄牙的试点项目中种植(Lieth et al., 2002; Geissler et al., 2009)。然而, 紫菀作为一种耐盐蔬菜作物引进时, 遇到了意想不到的困难(Ventura et al., 2013a)。为了使种植紫菀的土壤能够适合盐水灌溉, 配置的土壤成分为 6%沙子, 0.8%淤泥, 3.1%黏土, <0.1%有机质, pH=8。在这

种土壤中种植紫菀, 较高 pH 间接诱导了特定微量元素缺乏症, 使叶片发黄, 影响产品质量。Ventura et al.(2013b)提出了一个通过植物施肥改善紫菀(*Aster tripolium*)叶菜品质的技术方案。

另一种具有经济作物潜力的盐生植物是海茴香, 它以其抗坏血病特性而闻名。在过去, 水手们在航行途中, 沿着海上悬崖处收集海茴香叶片食用, 用于预防和治疗坏血病(Cunsolo et al., 1993)。迄今为止, 人们对海茴香的耐盐性、次生代谢物含量和抗氧化能力进行了广泛的研究(Cunsolo et al., 1993; Guil-Guerrero et al., 1999; Ben et al., 2005; Ben et al., 2006; Meot-Duros et al., 2009; Atia et al., 2011), 其中一项使用野外收集的四种生态型野生海茴香植物材料的研究, 结果揭示了不同生态型在产量、叶片外观、多酚和抗坏血酸含量等方面存在差异, 表明利用海茴香的遗传差异, 在选择高产和高营养代谢物含量基因型方面具有极大潜力。

一年生植物榆钱菠菜(*Atriplex hortensis*)和新西兰菠菜(*Tetragonia tetragonioides*)是可以作为菠菜替代品的盐生植物(Wilson et al., 2000; Słupski et al., 2010)。自古以来, 人们就因其可食用的叶子而种植榆钱菠菜, 目前仍作为盆栽草药, 在厨房花园中种植。榆钱菠菜比新西兰菠菜更耐盐。在以色列进行的一项农艺研究表明, 春季里由于榆钱菠菜提早开花, 导致收获期很短, 在此期间只能进行两次连续收获。如果改变采收方式, 转向选择性采收制度, 收获时只采收可销售的茎顶, 则在榆钱菠菜开花之前, 可有五个采收周期。大棚试验中, 灌溉盐度为 4 mM 的条件下, 榆钱菠菜的新鲜生物量最高产量可达 2.2 kg/m², 在 8 mM 盐度下, 新鲜生物量最高产量可达 1.4 kg/m²。由于实验中仅仅收获了可销售的茎顶部分, 因此没有进一步记录最终总产量, 无法估计可销售产品的产量损失。由于滨藜与菠菜相似的化学成分, 人们还建议将滨藜作为菠菜(*Spinacea oleracea*)的替代品或补充蔬菜类型(Carlsson et al., 1983)。同样, 新西兰菠菜除了硫氨基酸缺乏外, 具有良好的营养价值。此外, 烹饪和工艺处理, 包括焯水、冷冻、储存和蒸煮, 使新西兰菠菜中总氨基酸含量显著增加, 但不包括含蛋氨酸和半胱氨酸(Słupski et al., 2010)。

棘叶菊(*Inula crithmoides*)是 1996 提出的盐碱化农业的候选植物, 该品种传统上在黎巴嫩消费, 但在西班牙和意大利等地中海国家较少使用(Zurayk et al., 1996; Guarrera et al., 2006; Tardio et al., 2006)。在棘叶菊进行的 87 天的试盆栽试验中, 只有在盐度达到 20 mM 时, 棘叶菊每株产量为每天 18.8 g 湿重(Zurayk et al., 1996)。在为期 1 年的棘叶

菊盆栽试验中,以每月连续收获的方式采摘,在 50 mM 和 200 mM NaCl 的灌溉条件下,棘叶菊最大产量分别为 30 kg/m² 和 6 kg/m²。

当盐角草(*Salicornia*)和盐角木(*Sarcocornia*)作为一种美食蔬菜种植供人类食用时,人们只使用盐角草及盐角木的幼芽部分。为了确保其较高的市场价值,菜农们采用长日照操作和多次收获的农业技术来提高产量(Ventura et al., 2011a, b, 2013a)。由于盐角草属和盐角木属基因型之间存在差异,为进一步优化这些植物的营养价值提供了遗传基础和提升空间。盐角草和盐角木还含有抗氧化化合物,即多酚、 β -胡萝卜素和酰胺等;随着盐度的增加,这些化合物的含量也随之增加(Ventura et al., 2011a)。盐角草和盐角木茎部含盐量较高,但对它的营养价值影响很小,因为作为一种美食,人们食用茎部的量很少。

碱蓬(*Suaeda*)是分布比较广泛的盐生植物,幼苗可以作为特色蔬菜,种子可以作为食用油原料。异子碱蓬(*Suaeda aralocaspica*)种子干重含油>29%,含不饱和脂肪酸 93%,亚麻油酸和植物油酸最为丰富。盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种子油脂 25%左右,蛋白质 20%,油脂中不饱和脂肪酸 70%左右,营养价值特别丰富(Wang et al., 2012)。在含盐量约为 5 g/kg 土壤里种植,盐地碱蓬种子产量约为 2 000 kg/ha。植物育种家和研究人员一直在试图增加盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)的生物量和种子产量,人工栽培可以增加其种子产量 1~2 倍,而育种可增加种子产量 2~3 倍。采用盐度较高的盐碱水灌溉,能有效增加盐地碱蓬茎部生物量(邵秋玲等, 2004)。

我国在盐生植物蔬菜方面取得了重要进展,江苏农科院等单位收集了马齿苋、碱蓬、荠菜、苋菜、菜用枸杞和菜用苜蓿等特色蔬菜种质资源 500 多份,采用系统选育的方法,先后选育出“沿海碱蓬 1 号”、“苏马齿苋 1 号”、“苏马齿苋 2 号”、“苏马齿苋 3 号”、“绿苑碱蓬 1 号”、“绿苑海蓬子 1 号”等耐盐蔬菜新品种(洪立洲等, 2015)。利用“绿苑碱蓬 1 号”,在河北省张北县安固滩尔盐湖荒滩,成功种植了 10 万亩,获得了良好的经济效益和社会效益(孔凡晶等, 2019)。另外,我国药用植物有 6 000 余种,其中 100 余种盐生植物是重要的中药材。比如盐生植物甘草(*Glycyrrhiza*)、枸杞(*Lycium*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、白刺(*Nitraria*)、怪柳(*Tamarix*)、碱蓬、麻黄(*Ephedra*)、肉苁蓉(*Cistanche deserticola*)、锁阳(*Cynomorium songaricum*)等,在中成药中被广泛应用(赵可夫等, 2001; Zhao et al., 2002)。

1.2 盐生植物饲料

盐生植物作为饲料应用,应达到一定的标准,

需要从以下六个方面进行评价:植物的化学成分、消化率、适口性、利用方式、出现率及丰富度。高质量的盐生植物饲料,需要适口性高、消化率高和良好营养价值,包括蛋白质含量高、纤维、灰分和草酸含量低(El Shaer, 2006)。由于滨藜(*Atriplex*)植物内盐的积累较多,降低了大多数植物的营养价值和食品质量。因此, Pasternak(1990)认为,即使与其他养料相结合,滨藜作为有用的饲料作物的前景也相当有限。Barrett-Lennard et al.(2010)提出了一种不同的策略,他们认识到将大洋洲滨藜(*A. nummularia*)等植物与草本植物和一年生草料混合饲养非常重要。这些植物相结合,能满足对有效饲料作物的要求;并且大洋洲滨藜可以在中等盐度水平下生长。Norman et al.(2013)进一步讨论了这种方法,他们强调了自愿采食量(适口性、摄食后反馈)和营养价值(代谢能、盐、抗氧化剂、毒素)作为影响牲畜生产的因素的重要性。Norman et al.(2013)总结了成功使用盐生草和灌木混合植物系统的经验,就是充分发挥混合植物系统中盐生植物的优势,同时管理其负面影响。

Pasternak(1990)和 Bustan et al.(2005)也对盐生草类植物作为饲料的潜力进行了调查。事实上,虽然比滨藜品种耐盐性差,但在所有的测试中,海滨盐草(*Distichlis spicata*)的灰分含量从未超过干物质的 11%,这个含量约为盐生藜科植物灰分含量的一半,表明其作为饲料作物具有很大的潜力(Bustan et al., 2005)。海滨盐草(*Distichlis spicata*)的蛋白质含量在不同品种间差异很大,最低为 9.2%,最多为 18%,占干物质的 9%,与 Pasternak(1990)报道的大洋洲滨藜(*A. nummularia*)的蛋白质含量相似。禾草类也曾与滨藜之外的其他藜科盐生植物联合使用,经试验,毕氏盐角草(*Salicornia bigelovii*)是一种富含蛋白质的盐水灌溉的饲料作物(Glenn et al., 1991),但其高的灰分含量(高达 39%)限制了其营养潜力和饲料质量(Basmaeil et al., 2003)。为了克服这一问题,Glenn et al.(1992)将 50%的罗氏草基饲料替换毕氏盐角草。毕氏盐角草在海水中生长,收获后直接将植物植株浸泡在海水中。这一做法使盐的含量降低了约一半,导致灰分含量降为 16.7%。如果在饲养动物之前不除去种子,盐角草生物量中的蛋白质含量会更高。通过给羔羊喂食盐角草秸秆或种子的实验结论表明,在干旱的沿海地区,由于作物灌溉的淡水有限,这种盐生植物可以作为一种可接受的饲料替代品(Swingle et al., 1996)。另一方面,在骆驼饲养试验中,与草饲粮相比,如果在饲料中添加超过四分之一海水灌溉的盐角草,会对饲料的营养价值产生不利影响。盐角草含盐量多少直接影响其用

于反刍动物饲料,而盐的含量可以通过饮食中的植物部分来调节。因此,选择一些植物体内积累盐含量较低的盐生植物品种,可以提高其作为反刍动物饲料的取食价值。在盐生植物作为鱼饲料方面,Belal et al.(1999)成功地在罗非鱼(*Nile Tilapia*)饲料中,添加了40%盐角草粉来替代传统的鱼饲料,而对鱼的生长和身体组成成分没有不利影响。

1.3 盐生植物的工业用途

近年来,利用易于生产生物乙醇或生物柴油的农作物,如玉米、甘蔗或大豆进行生物燃料的生产受到了批评,因为进行生物质能源生产的资源需求与粮食生产发生了竞争,不仅是粮食作物,非粮食作物(如柳枝稷, *Panicum virgatum*)或短轮作木本多年生植物(如柳树和杨树),也依赖于现有稀缺的淡水和耕地资源(Dominguez-Faus et al., 2009)。因此,使用盐生植物作为生物质能源的原料具有一定的优势,因为它们利用未使用的边缘土地或盐碱地,而这类土地可以利用盐水灌溉。

Eshel 及其同事试验了两种沙漠盐生植物,桤柳(*Tamarix* spp.)和大戟(*Euphorbia tirucalii*),在极端沙漠条件下生产生物质(Eshel et al., 2010, 2011)。在4种桤柳中,约旦桤柳(*Tamarix jordanis*)纤维素含量高、半纤维素和酚含量低,乙醇发酵的特性好(Santi et al., 2014)。大戟(*Euphorbia tirucalii*)是一种来自东非的沙漠多肉植物,诺贝尔奖得主梅尔文·卡尔文就建议将其作为潜在的生物燃料作物(Nielsen et al., 1977; Calvin, 1980)。当用含盐污水(盐度为8~10 mM)灌溉时,它在移植后18个月的重量增加了60倍,产生了丰富的碳氢化合物,有可能直接转化为生物燃料(Eshel et al., 2010)。

第二种方法,是使用高耐盐性和高产的油料盐生植物生产生物油燃料。毕氏盐角草(*Salicornia bigelovii*)种子含油量高达30%,是主要的理想候选品种(Weete et al., 1970; Glenn et al., 1999; Alsaedi et al., 2000)。然而,由于毕氏盐角草种子成熟不均匀,体积小,机械收获时可能导致大约50%的损失(Glenn et al., 2013)。因此,需要为该类植物的种子收获开发一种特殊的机械收获技术。另一种具有积极前景的潜在生物燃料候选作物是海滨锦葵(*Kosteletzkya pentacarpos*),一种生产油籽的多年生盐生植物(Gallagher, 1985)。海滨锦葵可以在盐水灌溉的大片盐碱地上种植(Gallagher, 1985),因此,这类生物燃料作物不会与适合种植传统粮食作物的土地竞争,能使该区释放淡水资源用于另外更重要的目的。海滨锦葵的种子含有18%~22%的油,其成分与棉籽油相似。棉籽油是一种食用油,目前已成功用于生产生物柴油。由于育种和选择的限制,与大

豆相比,海滨锦葵的种子产量相对较低(1 500 kg/ha),大豆产量是2 300 kg/ha(Moser et al., 2013)。尽管如此,由于海滨锦葵的多年生生长习性可以允许进行多次收获,而使产量随着植物年龄的增长而增高。

2 我国盐湖盆地盐沼带土壤及盐水资源现状

我国是多盐湖的国家,盐湖主要分布在西部干旱或半干旱的经济欠发达地区。盐湖流域主要涉及青海、西藏、新疆、内蒙古,以及黑龙江、吉林、甘肃、宁夏等8省份,盐湖流域盐碱地面积为523.63万km²,占全国盐碱地的55.9%;人口约2.62亿,占全国人口的19.6%(暂未计港澳台地区)(郑绵平等, 1985; 郑喜玉等, 2002; 王现洁等, 2017)。除海水之外,含盐量大于1 g/L的水为咸水,广义的盐湖是湖水含盐量大于或等于1 g/L的湖泊。咸水分5个类型,分别为微咸水(含盐量1~3 g/L)、半咸水(含盐量3~5 g/L)、咸水(含盐量5~10 g/L)、盐水(含盐量10~50 g/L)以及卤水(含盐量大于50 g/L)。世界淡水、咸水和海水资源的总体比例关系为2.53:0.94:96.54,从现实可利用资源总量考察,淡水资源除去河川水、湖泊淡水、地下淡水之外,其余淡水资源均难以利用。其可利用比例减少为0.77,少于咸水资源量0.94(Gleick, 2009)。

根据国土资源部2003年12月公报信息,我国地下微咸水资源多年平均为277×10⁸ m³,半咸水121×10⁸ m³。全国地下淡水资源分布面积约为810万km²,地下微咸水分布面积为54万km²,地下半咸水、咸水分布面积84万km²。每年有近140×10⁸ m³盐度1~5 g/L地下微咸水和半咸水可以利用。我国旱区湖泊面积2.25万km²,包括盐湖在内,约占全国湖泊面积的27.9%。我国丰富的盐湖盐碱地和咸水资源为发展基于盐生植物的盐湖农业提供了物质条件。

3 发展我国盐湖农业的建议

除了藜麦、碱蓬等少数盐生植物被作为农作物大量种植以外,大部分的盐生植物只是小面积种植,或采收野生植物。盐生植物作为农作物进行大面积种植,还有漫长的路要走,需要开展大量育种和栽培技术研究。根据我国盐湖资源特点和科技发展趋势,对发展“盐湖农业”提出如下建议(孔凡晶等, 2019)。

(1)加强盐湖农业科技创新研究,把“盐湖农业”列入国家科技规划。集中多学科人才,逐步创建与发展我国盐湖全国性和地方性以至企业性专门研究开发机构,逐步建立具有我国特色的“盐湖农业”

创新体系。

(2)对盐湖流域气候、水资源、土壤和植被条件进行调查分析,把盐湖流域盐碱地进行功能区划,即可改良盐碱地、自然发展的盐碱地、混合发展的盐碱地。盐水域可划分为已有可利用盐生物资源(盐藻、螺旋藻、卤虫等)的盐水域、尚未发现盐生物资源的盐水域。干盐滩依据无机盐类的类型划分微生物群落类别,比如硫酸盐型微生物类群、碳酸盐型微生物类群、氯化物型微生物类群以及硝酸盐型微生物类群。通过现代生物学与技术等开展多学科研究,实现学科发展和资源的科学利用、农业潜力的提升。

(3)建立盐湖区域土壤、水文、气象、生物种群和优良种质资源等 5 个基础数据库;据此,结合不同地域的生物、水文水利和土壤技术进行农业改造,为发展盐湖农业提供坚实的科学技术依据。

(4)在青海、新疆、内蒙等不同的生态区设置不同的盐湖农业示范基地,建立起国家级一二三产业融合的盐湖农业基地。到 2030 年,在西部经济欠发达地区,若有 5% 的盐湖流域荒漠化的盐碱地得到利用,将会产生 500 万余亩的新增“耕地”,形成一批盐湖农业高值化产品,产生巨大的生态效益、经济效益和社会效益。到 2040 年,若有 10% 的盐湖流域盐碱地得到利用,将会产生 1 亿亩的新增“耕地”。

Acknowledgements:

This study was supported by Chinese Academy of Engineering (No. 2014-ZCQ-06), and National Natural Science Foundation of China (No. L1422036).

参考文献:

- 洪立洲,刘兴华,王茂文,2015. 江苏沿海特色盐土农业技术[M]. 南京:南京大学出版社.
- 孔凡晶,郑绵平,张洪霞,等,2019. 盐湖农业及其发展战略研究[J]. 中国工程科学,21(1): 148-152.
- 邵秋玲,谢小丁,张方申,等,2004. 盐地碱蓬人工栽培与品系选育初报[J]. 中国生态农业学报,12(1): 47-49.
- 王现洁,孔凡晶,孔维刚,等,2017. 发展柴达木盆地盐湖农业的资源基础[J]. 科技导报,35(10): 93-98.
- 赵可夫,冯立田,2001. 中国盐生植物资源[M]. 北京:科学出版社.
- 赵可夫,李法曾,樊守金,等,1999. 中国的盐生植物[J]. 植物学通报,16(3): 201-207.
- 赵可夫,周三,范海,2002. 中国盐生植物种类补遗[J]. 植物学通报,19(5): 611-613.
- 郑绵平,1995. 论“盐湖农业”[J]. 地球学报,16(4): 404-418.
- 郑绵平,2014. 盐湖农业与盐碱农业[J]. 科技导报,32(35): 1-3.
- 郑绵平,刘文高,向军,1985. 西藏扎布耶盐湖嗜盐菌、藻的发现 and 地质生态学意义[J]. 地质学报,59(2): 162-171.
- 郑喜玉,张明刚,徐昶,等,2002. 中国盐湖志[M]. 北京:科学

出版社.

References:

- ADOLF V I, JACOBSEN S E, SHABALA S, 2013. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Environmental and Experimental Botany, 92: 43-54.
- ALSAEEDI A H, ELPRINCE A M, 2000. Critical phosphorus levels for *Salicornia* growth[J]. Agricultural Journal, 92(2): 336-345.
- ARONSON J, WHITEHEAD E, 1989. Haloph: a Data Base of Salt Tolerant Plants of the World[M]. Tucson: University of Arizona.
- ATIA A, BARHOUMI Z, MOKDED R, et al., 2011. Environmental eco-physiology and economical potential of the halophyte *Crithmum maritimum* L. (Apiaceae)[J]. Journal of Medicinal plants Research, 5: 3564-3571.
- BARRETT-LENNARD E G, SETTER T L, 2010. Developing saline agriculture: moving from traits and genes to systems[J]. Functional Plant Biology, 37: iii-iv.
- BASMAEIL S, AL-SAIADY M, ABOUHEIF MA, et al., 2003. Effect of graded levels of crude protein on nutrient digestibility of rhodesgrass hay or dried *Salicornia* biomass diets in camels[J]. Journal of King Saud University of Agricultural Science, 2: 117-125.
- BELAL I E H, AL D M, 1999. Replacement of fish meal with *Salicornia* meal in feed for Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 30(2): 285-289.
- BEN A N, BEN H K, RANIERI A, et al., 2006. Kinetics of the antioxidant response to salinity in *Crithmum maritimum*[C]//OZTURK M, WAISEL Y, KHAN M A, et al., Biosaline agriculture and salinity tolerance in plants. Basel: Birkhauser Verlag: 83-88.
- BEN H K, BEN Y N, RANIERI A, et al., 2005. Changes in content and fatty acid profiles of total lipids and sulfolipids in the halophyte *Crithmum maritimum* under salt stress[J]. Journal of Plant Physiology, 162: 599-602.
- BOER B, 2006. Halophyte research and development: what needs to be done next?[C]//KHAN M A, WEBER D J. Ecophysiology of high salinity tolerant plants. Berlin: Springer Verlag: 397-399.
- BUHMANN A, PAPENBROCK J, 2013. An economic point of view of secondary compounds in halophytes[J]. Functional Plant Biology, 40: 952-967.
- BUSTAN A, PASTERNAK D, PIROGOVA I, et al., 2005. Evaluation of saltgrass as a fodder crop for livestock[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85: 2077-2084.
- CALVIN M, 1980. Hydrocarbons from plants: analytical methods and observations[J]. Naturwissenschaften, 67: 525-533.
- CARLSSON R, CLARKE E M W, 1983. *Atriplex hortensis* L. as a leafy vegetable, and as a leaf protein concentrate plant[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 33: 127-133.
- CUNSOLO F, RUBERTO G, AMICO V, et al., 1993. Bioactive

- metabolites from Sicilian marine fennel, *Crithmum maritimum*[J]. Journal of Natural Products, 56: 1598-1600.
- DAVY A J, BISHOP G F, COSTA C S B, 2001. *Salicornia* L. (*Salicornia pusilla* J. Woods, *S. ramosissima* J. Woods, *S. europaea* L., *S. obscura* P.W. Ball & Tutin, *S. nitens* P.W. Ball & Tutin, *S. fragilis* P.W. Ball & Tutin, P. W. Ball & Tutin and *S. dolichostachya* Moss)[J]. Journal of Ecology, 89: 681-707.
- DOMINGUEZ-FAUS R, POWERS S E, BURKEN J G, et al., 2009. Thewater footprint of biofuels: a drink or drive issue?[J]. Environmental Science and Technology, 43: 3005-3010.
- eHALOPH, 2024. Salt-tolerant plants[OL/EB]. [2024-06-25]. <http://www.sussex.ac.uk/affiliates/halophytes/>.
- EL SHAER H M, 2006. Halophytes as cash crops for animal feeds in arid and semi-ard regions[C]//OZTURK M, WAISEL Y, KHAN M A, et al. Biosaline agriculture and salinity tolerance in Plants. Basel: Birkhauser Verlag: 117-128.
- ESHEL A, OREN I, ALEKPAROV C, et al., 2011. Biomass production by desert halophytes: alleviating the pressure on the scarce resources of arable soil and fresh water[J]. European Journal of Plant Science and Biotechnology, 5: 48-53.
- ESHEL A, ZILBERSTEIN A, ALEKPAROV C, et al., 2010. Biomass production by desert halophytes: alleviating the pressure on food production[C]//Proceedings of the 5th IASME/WSEAS international conference on energy and environment. Recent advances in energy and environment. Cambridge: 362-367.
- FLOWERS T J, COLMER T D, 2008. Salinity tolerance in halophytes[J]. New Phytologist, 179: 945-963.
- FLOWERS, T J, YEO A R, 1995. Breeding for salinity resistance in crop plants: Where next?[J]. Functional Plant Biology, 22: 875-884.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. Global Map of Salt-affected Soils (GSASmap)[OL/EB]. [2024-06-25]. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/gasmap/en>.
- FRANKE W, 1982. Vitamin C in sea fennel (*Crithmum maritimum*), an edible wild plant[J]. Economic Botany, 36: 163-165.
- GALLAGHER J L, 1985. Halophytic crops for cultivation at seawater salinity[J]. Plant and Soil, 89: 323-336.
- GARCIA-CAPARROS P, AL-AZZAWI M J, FLOWERS, T J, 2023. Economic Uses of Salt-Tolerant Plants[J]. Plants, 12: 2669.
- GEISSLER N, HUSSIN S, KOYRO H W, 2009. Elevated atmospheric CO₂ concentration ameliorates effects of NaCl salinity on photosynthesis and leaf structure of *Aster tripolium* L[J]. Journal of Experimental Botany, 60: 137-151.
- GLEICK P H, 2009. Peak water[C]//The world's water 2008-2009. The Biennial Report on Freshwater Resources. Washington, Covelo; London: Island Press: 1-16.
- GLENN E P, ANDAY T, CHATURVEDI R, et al., 2013. Three halophytes for salinewater agriculture: an oilseed, a forage and a grain crop[J]. Environmental and Experimental Botany, 92: 110-121.
- GLENN E P, BROWN J J, BLUMWALD E, 1999. Salt tolerance and crop potential of halophytes[J]. Critical Review in Plant Science, 18: 227-255.
- GLENN E P, COATES W E, RILEY J J, et al., 1992. *Salicornia bigelovii* Torr: a seawater-irrigated forage for goats[J]. Animal Feed Science and Technology, 40: 21-30.
- GLENN E P, O'LEARY J W, WATSON M C, et al., 1991. *Salicornia bigelovii* Torr.: an oilseed halophyte for seawater irrigation[J]. Science, 251: 1065-1067.
- GUARRERA P M, SALERNO G, CANEVA G, 2006. Food, flavouring and feed plant traditions in the Tyrrhenian sector of Basilicata, Italy[J]. Journal of Ethno biology and Ethno medicine, 2: 37.
- GUIL-GUERRERO J L, RODRIGUEZ-GARCA I, 1999. Lipids classes, fatty acids and carotenes of the leaves of six edible wild plants[J]. European Food Research and Technology, 209: 313-316.
- HASEGAWA P M, BRESSAN R A, ZHU J K, et al., 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 51: 463-499.
- HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N, 2020. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 11(52): 33017-33027.
- HONG Lizhou, LIU Xinghua, WANG Maowen, 2015. Jiangsu coastal characteristic saline soil agricultural technology[M]. Nanjing: Nanjing University Press(in Chinese).
- KONG Fanjing, ZHENG Manping, ZHANG Hongxia, et al., 2019. Salt lake agriculture and its development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 21(1): 148-152(in Chinese with English abstract).
- KSOURI R, MEGDICHE K W, JALLALI I, et al., 2012. Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical, nutraceutical and food applications[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 32(4): 289-326.
- LIETH H, MOCHTCHENKO M, 2002. Halophyte uses in different climates IV[C]//Cashcrop halophytes for future halophyte growers. Leiden: Backhuys Publishers.
- MEOT-DUROS L, MAGNE C, 2009. Antioxidant activity and phenol content of *Crithmum maritimum* L. leaves[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 47: 37-41.
- MOSER B R, DIEN B S, SELISKAR D M, et al., 2013. Seashore mallow (*Kosteletzkya pentacarpos*) as a salt-tolerant feedstock for production of biodiesel and ethanol[J]. Renewable Energy, 50: 833-839.
- NIELSEN P E, NISHIMURA H, OTVOS J W, et al., 1977. Plant crops as a source of fuel and hydrocarbon-like materials[J]. Science, 198: 942-944.
- NORMAN H C, MASTERS D G, BARRETT-LENNARD E G, 2013. Halophytes as forages in saline landscapes: interactions between plant genotypes and environment change their feeding value to ruminants[J]. Environmental and Experimental Botany, 92: 96-109.

- PANTA S, FLOWERS T, LANE P, et al., 2014. Halophyte agriculture: success stories[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 107: 71-83.
- PARVAIZ A, SATYAWATI S, 2008. Salt stress and phyto-biochemical response of plants-a review[J]. *Plant, Soil and Environment*, 54: 89-99.
- PASTERNAK D, 1990. Fodder production with saline water[R]. Beer Sheva: Institutes for Applied Research, Ben-Gurion University of the Negev.
- SACCÒ M, WHITE N E, HARROD C, et al., 2021. Salt to conserve: a review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems[J]. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 96(6): 2828-2850.
- SANTI G, D'ANNIBALE A, ESHEL A, et al., 2014. Bioethanol production from xerophilic and salt-resistant *Tamarix jordanis* biomass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 61: 73-81.
- SANTOS J, AL-AZZAWI M, ARONSON J, et al., 2016. eHALOPH a Database of Salt-Tolerant Plants: Helping put Halophytes to Work[J]. *Plant & Cell Physiology*, 57(1): e10.
- SHAO Qiuling, XIE Xiaoding, ZHANG Fangshen, et al., 2004. A preliminary study on the artificial cultivation and breeding selection of *Suaeda salsa*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 12(1): 47-49(in Chinese with English abstract).
- SIMOPOULOS A P, 2004. Omega-3 fatty acids and antioxidants in edible wild plants[J]. *Biological Research*, 37: 263-277.
- SŁUPSKI J, ACHREM-ACHREMOWICZ J, LISIEWSKA Z, et al., 2010. Effect of processing on the amino acid content of New Zealand pinach (*Tetragonia tetragonioides* Pall. Kuntze)[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 45: 1682-1688.
- STUCHLIK M, ZAK S, 2002. Vegetable lipids as components of functional foods[J]. *Biomedical Papers*, 146: 3-10.
- SWINGLE R S, GLENN E P, SQUIRES V, 1996. Growth performance of lambs fed mixed diets containing halophyte ingredients[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 63: 137-148.
- TARDIO J, PARDO D E, SANTAYANA M, et al., 2006. Ethno botanical review of wild edible plants in Spain[J]. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 152: 27-71.
- VENTURA Y, MYRZABAYEVA M, ALIKULOV Z, et al., 2013b. The importance of iron supply during repetitive harvesting of *Aster tripolium*[J]. *Functional Plant Biology*, 40: 968-976.
- VENTURA Y, SAGI M, 2013a. Halophyte crop cultivation: the case for *Salicornia* and *Sarcocornia*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 144-153.
- VENTURA Y, WUDDINEH W A, MYRZABAYEVA M, et al., 2011a. Effect of seawater concentration on the productivity and nutritional value of annual *Salicornia* and perennial *Sarcocornia* halophytes as leafy vegetable crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 128: 189-196.
- VENTURA Y, WUDDINEH W A, SHPIGEL M, et al., 2011b. Effects of day length on flowering and yield production of *Salicornia* and *Sarcocornia* species[J]. *Scientia Horticulturae*, 130: 510-516.
- WAGENVOORT W A, VAN DE VOOREN J G, BRANDENBURG W A, 1989. Plant domestication and the development of sea starwort (*Aster tripolium* L.) as a new vegetable crop[J]. *Acta Horticulturae*, 242: 115-122.
- WANG H L, WANG L, TIAN C Y, et al., 2012. Germination dimorphism in *Suaeda acuminata*: A new combination of dormancy types for heteromorphic seeds[J]. *South African Journal of Botany*, 78: 270-275.
- WANG Xianjie, KONG Fanjing, KONG Weigang, et al., 2017. Resource base of developing saline lake agriculture in Qaidam Basin[J]. *Science & Technology Review*, 35(10): 93-98(in Chinese with English abstract).
- WANG Xianjie, KONG Fanjing, KONG Weigang, et al., 2018. Edaphic characterization and plant zonation in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 8: 1-9.
- WEETE J D, RIVERS W G, WEBER D J, 1970. Hydrocarbon and fatty acid distribution in the halophyte, *Salicornia bigelovii*[J]. *Phytochemistry*, 9(9): 2041-2045.
- WILSON C, LESCH S M, GRIEVE C M, 2000. Growth stage modulates salinity tolerance of New Zealand Spinach (*Tetragonia tetragonioides*, Pall) and Red Orach (*Atriplex hortensis* L.)[J]. *Annals of Botany*, 85: 501-509.
- ZHAO Kefu, FAN Hai, UNGAR I A, 2002. Survey of halophyte species in China[J]. *Plant Science*, 163(3): 491-498.
- ZHAO Kefu, FENG Litian, 2001. Halophytes in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHAO Kefu, LI Fazeng, FAN Shoujin, et al., 1999. Halophytes in China[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 16(3): 201-207(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Kefu, ZHOU San, FAN Hai, 2002. Addendum of Halophytes Species in China[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 19(5): 611-613(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, 1995. On "Saline Lake Agriculture"[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 16(4): 404-418(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, 2014. Salt lake agriculture and saline-alkali agriculture[J]. *Science & Technology Review*, 32(35): 1-3(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, LIU Wengao, XIANG Jun, 1985. The discovery of halophilic algae and halobacteria at Zabuye Salt Lake Tibet and preliminary study on the geoecology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 59(2): 162-171(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Xiyu, ZHANG Minggang, XU Chang, et al., 2002. Salt Lake Records of China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZURAYK R, BAALBAKI R, 1996. *Inula crithmoides*: a candidate plant for saline agriculture[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10: 213-223.