

# 滨海盐渍区海水养殖废水利用与减蒸抑盐措施研究<sup>①</sup>

赵耕毛<sup>1,2</sup>, 刘兆普<sup>1,2\*</sup>, 张博<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095)

**摘要:** 在半干旱的莱州地区, 利用微区试验研究了海水养殖废水灌溉和秸秆覆盖双重作用下滨海盐土水盐行为及其耐盐能源作物(菊芋)效应。结果表明: 秸秆覆盖能明显抑制土面蒸发, 具有很好的保墒效果; 秸秆覆盖能明显减弱土壤盐分的表聚作用, 有效缓解了盐分对作物的直接接触危害。因海水养殖废水灌溉带入土体的大量盐分通过低频次的补充灌溉措施, 以及夏季雨水的自然淋洗, 土壤表层盐分在可控范围之内。秸秆覆盖能改善作物株形, 显著增加作物产量, 为我国滨海盐碱地区高矿化度的咸水资源有效利用以及耐盐能源作物生产提供了基本依据。

**关键词:** 秸秆覆盖; 海水养殖废水; 滨海盐碱地; 菊芋

**中图分类号:** S15

我国盐土总面积近 1 亿  $\text{hm}^2$ , 其中滨海盐土面积 3000 万  $\text{hm}^2$ , 是我国重要的土地后备资源和可再生资源<sup>[1]</sup>。突破传统农业概念, 根据耐盐植物适盐性特点, 在盐土上发展种植业, 并深度开发其产品, 被称之为盐土农业。盐土农业是种植业又一次革命, 它不仅可为人类提供大量食用、观赏、药用、饲用以及作为生物质能源的原料, 而且可为海涂区土壤改良、生态修复以及维持生态平衡具有重要价值<sup>[2]</sup>。

我国滨海盐土多分布在湿润-半干旱气候区, 该地区多有海水入侵发生, 淡水资源极为缺乏。自 20 世纪 90 年代以来, 沿海地区人民为了维持正常农业生产, 开始利用地下入侵海水或海水养殖废水等资源灌溉耐盐粮食作物(如玉米、小麦)、经济作物(棉花)、能源作物(菊芋、油葵)等, 取得了很好的经济和社会效益<sup>[3]</sup>。

目前, 国内外有关微咸水灌溉方面的文献较多<sup>[4-6]</sup>, 但在高矿化度的农业水资源利用方面研究十分薄弱<sup>[7]</sup>。本文通过研究秸秆覆盖和海水养殖废水联合作

用条件下土壤水盐特征以及作物效应, 旨在为海涂区咸水资源的合理运筹和耐盐能源作物(菊芋)的栽培技术提供相应的理论依据和实践基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验地点位于山东莱州市西由镇, 该地区属暖温带东亚季风大陆性气候, 年平均降雨量 550 mm, 平均蒸发量 2 116.2 mm。

供试作物为菊芋 (*Helianthus tuberosus* L.), 又名洋姜, 是一种集耐盐碱、耐贫瘠、耐旱、抗病虫于一体的, 适宜性极为广泛的经济作物。其叶片可以提取杀虫菊脂, 茎秆可以做成高密度纤维板, 块茎可以酿造工业酒精, 因此有着极高的推广应用价值和研究价值。

供试土壤为滨海盐土(潮滩盐土), 基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Soil basic properties used in the experiment

土壤层次 (cm)	总盐 (g/kg)	pH	颗粒组成 (g/kg)		
			砂粒 2~0.02 mm	粉粒 0.02~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm
0~20	0.52	7.75	826	89	85
20~40	0.60	7.83	826	81	93
40~60	0.64	7.88	827	80	93

①基金项目: 国家自然科学基金项目(30600086)资助。

\* 通讯作者(sea@njau.edu.cn)

作者简介: 赵耕毛(1975—), 男, 江苏海门人, 博士, 讲师, 主要从事近海资源利用与生态修复研究。E-mail: seawater@njau.edu.cn

供试水样为海水养殖废水，其 EC 25.6 dS/m、pH 7.35、总N 6.5 mg/L、总P 1.35 mg/L。试验设两因素，即秸秆覆盖（以 M 表示）和淋洗份额（以 L 表示）。秸秆覆盖设两个水平，即不覆盖（M0）和覆盖（M1）；淋洗份额设两个水平，即无淋洗份额（L0）和 L1 = 0.3。试验共计 4 个处理：即 M0L0、M0L1、M1L0、M1L1，各处理设 3 次重复，按随机区组排列设计。微区由水泥筑成，长宽高分别为 1.5 m × 1.5 m × 1 m，壁厚 20 cm，且高出地表 10 cm。2008 年 3 月底每微区播种 15 株，行间距为 40 cm × 25 cm。播种前施有机肥（猪粪）30 t/hm<sup>2</sup>。菊芋块茎初始膨大期（6 月 13 日）和块茎膨大盛期（9 月 11 日）各灌溉 1 次。灌溉后将玉米秸秆覆盖其微区表面。

### 1.2 样品采集与分析

播种前和收获时，分层采集土壤样品，分析全盐、pH 等理化性状；灌溉前分析海水养殖废水以及自来水样品，测定其电导率、pH 值、营养盐含量等指标；收获时用 AWH-30 kg 型电子秤测定生物学产量，并将土壤样品带回江苏省海洋生物学重点实验室分析，分析项目有电导率、pH 等<sup>[8]</sup>。

### 1.3 数据统计

用 Excel 软件和 SPSS11.0 (statistical analysis system)，分析各指标的平均值、标准差以及检验显著性差异（不同字母如 a, b, 表示 p < 0.05 水平上具有显著性差异；相同字母则表示在该水平上不具有显著性差异）。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕层土壤含水量变化

海水养殖废水灌溉后，立刻在土壤表面覆于秸秆。在 6 月 14—6 月 20 日期间，用中子土壤水分仪对不同处理土壤表层水分（20 cm 处）进行了连续动态观测。结果表明：用秸秆覆盖的养殖废水处理，土壤水分含量比不覆盖的养殖废水处理高 1.60%（已扣除土壤水分初始值的差异），表明秸秆覆盖对减少土面水分蒸发起到了一定作用（图 1）。对于不灌溉处理，秸秆覆盖处理土壤含水量仅比不覆盖处理高 0.2%。表明：高土壤含水量条件下，秸秆覆盖对于土壤水分的保蓄作用要明显强于低土壤含水量情况。

### 2.2 土壤剖面盐分分布

秸秆覆盖对于调控土壤盐分运动有一定作用，在海水养殖灌溉条件下这种作用越明显（图 2）。一般情况下，土壤水分的运动决定着土壤盐分的运动。在

自然条件下（或称非灌溉条件下），土壤含水量较小，土面蒸发作用十分微弱，因此无论是否秸秆覆盖，土壤盐分在剖面的分布比较均一。从图 2 可以看出，M0L0 和 M1L0 两处理，土壤盐分处于较低水平，均低于 0.6 g/kg。

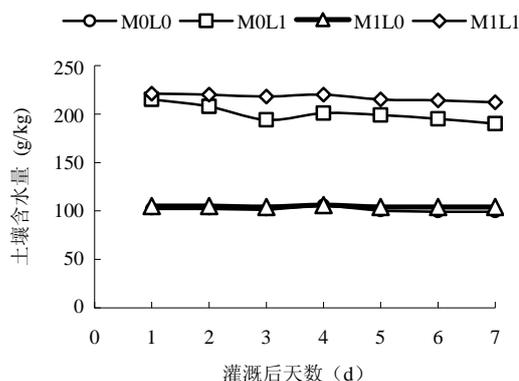


图 1 海水养殖废水灌溉后土壤水分动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil moisture after irrigation with saline aquaculture wastewater

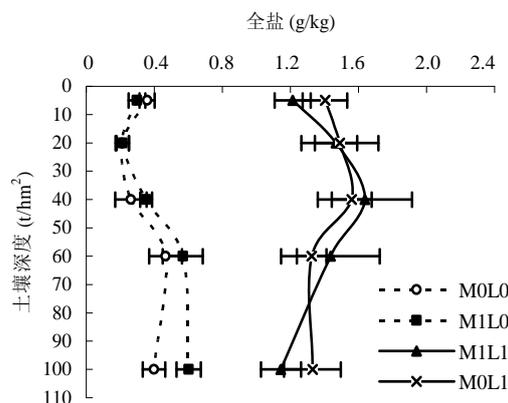


图 2 秸秆覆盖对土壤盐剖面分布的影响

Fig. 2 Effects of straw coverage on salt contribution in soil profiles

然而，海水养殖废水灌溉条件下，秸秆覆盖使土壤盐水分发生明显分异。在地表裸露的情况下，地表蒸发强烈，使土壤盐分大量表聚，表现为 0~10 cm 土壤层次盐分明显高于秸秆覆盖。10~30 cm 土壤层次，秸秆覆盖的作用并不明显，两者盐分相差仅为 0.02 g/kg。30~70 cm 的土壤层次，秸秆覆盖下土壤盐分高于不灌溉的情况；而 70 cm 以下，盐分分布则反之。由此表明，秸秆覆盖可抑制土壤盐分向 0~20 cm 层次运输，从而浅根系作物（如菊芋）能免于盐害，得以正常生长。

此外, 尽管选择淋洗份额为 0.3 的海水养殖废水灌溉使土壤盐分明显增加, 但仍在菊芋的耐盐临界值以内<sup>[9]</sup>, 因此不会对菊芋的生长以及作物产量造成影响。

### 2.3 植株形态学特征

株高和茎粗作为形态学指标, 可以表征植株生长状况, 它对于评估逆境条件下的产量形成起着重要作用。雨养条件下, 无论是否地表覆盖, 菊芋株高没有明显差异 (图 3); 淋洗份额 (L) 为 0.3 的海水养殖废水灌溉, 地表覆盖的菊芋株高明显高于不覆盖处理, 表明覆盖对于抑制地表蒸发, 保持耕

层土壤水分起到积极作用。土壤水势的增加, 相应地降低了土壤溶液盐离子浓度, 从而减少了菊芋盐分胁迫, 促进了植株生长。

对于菊芋茎粗而言, 无论是否覆盖或灌溉, 均无明显变化 (图 3), 表明地表覆盖或灌溉均不能影响植株横向伸展。以上结论可以说明, 地表覆盖是半干旱滨海地区咸水农业利用的重要措施之一, 对于保蓄土壤水分、缓解作物盐分胁迫和保障作物正常生长发育以及将来耐盐植物的产量形成起到积极作用。

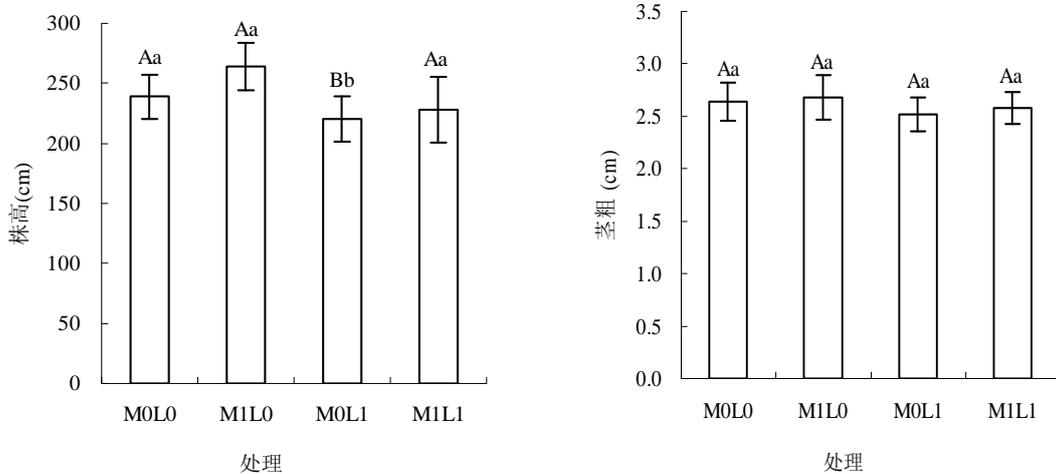


图 3 秸秆覆盖对盐胁迫条件下菊芋株高与茎粗的影响

Fig.3 Effects of straw coverage on plant height and diameter of Jerusalem artichoke under salt stress conditions

### 2.4 菊芋块茎产量

在滨海半干旱区, 由于降水不能满足植物需水量, 作物大量减产。对于耐盐作物菊芋而言, 尽管有一定的抗旱能力, 但是经济产量也受到了明显影响 (图 4)。雨养条件下无论地表覆盖与否, 菊芋块茎产量较低, 本试验中仅为  $36.9 \text{ t/hm}^2$  (M0L0) 和  $37.8 \text{ t/hm}^2$  (M1L0)。然而, 利用高矿化度海水养殖废水灌溉, 并没有使菊芋块茎产量显著提高 ( $38.8 \text{ t/hm}^2$ ), 表明尽管水分部分得到了满足, 但由于没有采取地表覆盖等措施, 盐分在作物根部积累, 影响了根系生长以及块茎的膨大和最终产物的形成和运输等过程。与此相反, 地表覆盖条件下, 海水养殖废水灌溉可取得很高的菊芋块茎产量 ( $49.2 \text{ t/hm}^2$ )。

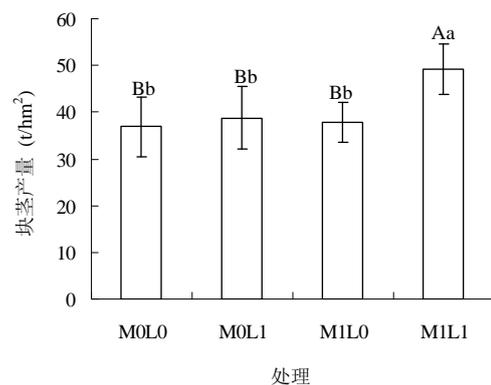


图 4 海水养殖废水灌溉与秸秆覆盖对菊芋块茎产量的影响

Fig. 4 Tuber yield of Jerusalem artichoke under saline aquaculture water irrigation and straw coverage

## 3 讨论

海水养殖废水灌溉能明显增加土壤水分, 地表覆盖对于减少土面蒸发、保蓄水分起到重要作用 (图 1)。

海水养殖废水灌溉后一周内, 尽管初夏地表蒸发十分强烈, 但土壤表层含水量仍可保持在 20% 左右, 反

之不灌溉则接近萎焉点(9.8%), 直接影响了作物对水分的正常吸收和利用。一般认为, 土壤水分运动取决于水势梯度和温度两因素, 高含水量的土壤水分运动多取决于水势梯度, 反之取决于温度<sup>[10-11]</sup>。海水养殖废水灌溉与地表覆盖影响了土壤水势以及地表蒸发强度, 从而致使表层土壤含水量:  $MIL1 > MOL1$ 。然而, 低土壤含水量情况下, 无论地表覆盖与否, 对于高冠作物而言, 土壤温度比较恒定, 因此覆盖效果并不明显。

海水养殖废水灌溉, 同样影响着土壤剖面盐分的积累与分布(图2)。通常, 选择较小淋洗份额(Leaching fraction), 如 0.1 和 0.2, 土壤盐分主要积累在土壤耕层<sup>[12]</sup>。考虑到将盐分有效淋洗出土壤耕层, 又不能因灌溉输入大量盐分, 覆盖条件下选择淋洗份额为 0.3 获得了良好的淋洗抑盐效果。菊芋根系和块茎主要分布层(0~20 cm), 土壤盐分明显少于不覆盖且养殖废水灌溉的情况; 且地表覆盖土壤盐分主要积累在 60 cm 的土层以下。池宝亮等<sup>[13]</sup>研究了不同秸秆利用方式下的土壤水盐运动规律, 认为表面覆盖秸秆可明显地抑制土壤蒸发, 保持土壤水分, 提高入渗淋盐效果, 防止耕层积盐, 是盐碱地管理中值得推广应用的农艺措施。郑九华等<sup>[14]</sup>秸秆覆盖条件下利用微咸水灌溉棉花, 结果表明秸秆覆盖抑制了微咸水灌溉后土壤盐分的表聚化, 因而减轻了微咸水灌溉对棉花生长的不良影响。李红等<sup>[15]</sup>同样证实, 只要措施得当, 微咸水灌溉能够确保冬小麦、玉米等作物根系活动层不积盐, 从而保证了作物的产量。

与上述研究不同的是本研究采用高矿化度海水养殖废水灌溉, 覆盖条件下菊芋产量大幅提高(表2), 反映了海水养殖废水灌溉的可行性。因此诸如海水养殖废水等劣质水资源的农业利用和地表覆盖措施, 是滨海半干旱区农业持续发展的可靠保障, 同时为我国未来几年生物质能源产业的蓬勃发展, 以及海洋环境的改善提供了崭新思路和实践依据。

#### 参考文献:

- [1] 刘兆普, 沈其荣, 尹金来. 滨海盐土农业. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [2] 徐质斌. 山东海水灌溉农业的发展前景. 发展论坛, 2000(1): 24-25
- [3] 陈铭达, 刘兆普, 赵耕毛, 马小伟, 刘海伟. 海水入侵区地下微咸水补充灌溉冬小麦的研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 83-87
- [4] Chauhana CPS, Singha RB, Gupta SK. Supplemental irrigation of wheat with saline water. Agricultural Water Management, 2008, 95(3): 253-258
- [5] Murtazaa GA, Ghafoor A, Qadir M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2): 98-114
- [6] Hamdya A, Sardo V, Ghanem KAF. Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. Agricultural Water Management, 2005, 78(1/2): 122-127
- [7] Ghadiri H, Dordipour I, Bybordi M, Malakouti MJ. Potential use of Caspian Sea water for supplementary irrigation in Northern Iran. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 209-244
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999: 12-195
- [9] 赵耕毛. 莱州湾地区海水养殖废水灌溉耐盐植物—菊芋和油菜的研究(博士学位论文). 南京: 南京农业大学, 2006
- [10] Gardner WR. Solution of the flow equation for the drying of soils and other porous media. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1959, 23: 183-187
- [11] 任理. 野外非饱和土壤水动态的数值模拟. 武汉水利电力学院学报, 1991, 24(3): 354-360
- [12] Rhoades JD, Kandiah A, Mashali AM. The Use of Saline Waters for Crop Production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992
- [13] 池宝亮, 庞金梅, 焦晓燕. 秸秆不同覆盖方式在控制根层盐化中的作用. 山西农业大学学报, 1994, 14(4): 440-443
- [14] 郑九华, 冯永军, 于开芹, 王兆峰, 袁秀杰. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉棉花试验研究. 农业工程学报, 2002, 18(4): 26-31
- [15] 李红, 李庆朝. 微咸水灌溉对小麦、玉米及土壤盐分的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 72-74

## Studies on Utilization of Saline Aquaculture Water and Measures to Reduce Evaporation and Salt Accumulation in Subarid Coastal Zones

ZHAO Geng-mao<sup>1,2</sup>, LIU Zhao-pu<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>

(1 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;*

2 *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Marine Biology, Nanjing 210095, China*)

**Abstract:** In subarid areas of Lai Chou, plot experiment was conducted to study the effects of soil-crop systems under saline aquaculture water irrigation and straw coverage conditions. The results showed that straw coverage could inhibit soil water evaporation, thus could maintain soil moisture; moreover, straw coverage could significantly reduce salt accumulation in surface soil layer and effectively alleviate crop salt stress due to the direct contact with salts. A high amount of salt, as a result of aquaculture water irrigation, could be leached out by low-frequency supplementary aquaculture water irrigation as well as natural rain water in the summer; the accumulated salts in soil was under control within salt-tolerant threshold of Jerusalem artichoke. Straw coverage could improve effectively plant morphology and increase significantly crop yield. Therefore, straw coverage is a reliable agronomic technique for the use of high saline water in the coastal salinized areas.

**Key words:** Straw coverage, Aquaculture water, Coastal saline-alkali soil, Jerusalem artichoke