

滨海盐渍区利用异源海水养殖废水 灌溉耐盐能源植物(菊芋)研究

赵耕毛,刘兆普*,汪 辉,张 博
(南京农业大学资源与环境科学学院,江苏 南京 210095)

摘 要: 通过田间微区试验,研究了异源养殖废水农业利用对耐盐能源植物(菊芋)栽培体系土壤性状、植物生长及产量的影响,同时利用 Watersuit 直观模型对系统作了安全性评估。结果表明:异源养殖废水灌溉土壤有明显积盐趋势,尤其是高盐度的对虾养殖废水,土壤盐分高达 2.69 g/kg;而钠吸附比(SAR)海参养殖废水最高,其值为 7.4 (mmol/L)^{1/2};异源养殖废水灌溉菊芋茎叶生长受到抑制,但能明显促进根系生长;与淡水灌溉相比,除对虾养殖废水块茎产量受到影响外,其他两个养殖水处理块茎产量均无明显差异;以菊芋块茎产量作为基准,其耐盐临界值为 24.65 dS/m。安全评价结果表明,适宜盐度养殖废水补充灌溉菊芋,可保证土壤安全和取得较高块茎产量。

关键词: 海水养殖废水;耐盐能源植物;盐分;碱化度;生长;产量;安全

中图分类号: S273.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)03-0107-05

我国是海水养殖大国,截止 2006 年,我国海水养殖面积已达 1 243 703 hm²,海水养殖总产量已达 10 612 865 t,养殖总产量跃居世界首位^[1]。海水养殖在保障我国粮食安全的同时,极大地满足人们的营养需求、改善人们的膳食结构,提高人们生活水平。

自 20 世纪 90 年代,海水养殖业一直面临着水体污染加重、养殖病害频发、养殖效益下降等诸多问题。因此海水养殖水体污染修复和治理方面的研究,日益成为国际上该领域探讨的热点问题^[2~4]。

海水养殖废水的处理方法主要有物理、化学、生物和综合处理等方法。但是,生物处理方法是目前研究海水养殖废水处理和养殖污染控制的一个重要趋势^[5]。这种方法对环境友好,费用低,适用于各种易变化的水域条件,其最大优点是使用可再生材料和能源,并且不会对环境造成二次污染。

菊芋是我国目前在沿海滩涂推广种植的主要生物质能源植物之一,盐碱地上发展生物质能源产业是我国应对国际石油危机最重要的战略性决策^[6]。本文将不同来源(异源)海水养殖废水用于灌溉耐盐能源植物——菊芋,通过构建海涂种植—养殖复合生态系统,探索不同来源的海水养殖废水灌溉效应,并对系统安全作初步评估,旨在为我国生物质能源产业的发展提供崭新思路与实践依据。

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(南京农业大学海洋“863”中试基地)。该地区属暖温带东亚季风大陆性气候(半干旱),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。

供试土壤属轻度盐渍化砂壤土,基本理化性质见表 1。试验设 5 个处理:即 CK1(不灌溉)、CK2(淡水灌溉)和不同来源的海水养殖废水处理(对虾养殖废水,以 W1 表示;海参养殖废水,以 W2 表示;大鲮鲆养殖废水,以 W3 表示),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。2007 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/hm²。菊芋块茎初始膨大期(6 月 15 日)和块茎膨大盛期(9 月 12 日)各灌溉 1 次。灌溉定额为 1 350 m³/hm²。供试水样的

收稿日期:2009-01-05
基金项目:国家自然科学基金项目(30600086)
作者简介:赵耕毛(1975—),男,江苏海门人,博士,讲师,研究方向为近海资源利用与生态修复。E-mail: seawater@njau.edu.cn。
* 通讯作者:刘兆普(1947—),教授,博士生导师,研究方向为海岸带资源利用与生态管理。E-mail: sea@njau.edu.cn。

基本性质参见表 2。

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^[7]; 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^[8]。收获时用 AWH-30 kg 型电子秤测定其生物学产量。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、盐基离子含量等。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of soil used in the experiment

土壤层次 Depth (cm)	pH	总盐 Total salt content (g/kg)	容重 Bulk density (mg/m ³)	颗粒组成 Particle composition (%)		
				砂粒 Sand 2~0.02 mm	粉粒 Silt 0.02~0.002 mm	黏粒 Clay <0.002 mm
0~20	7.75	0.52	1.27	82.6	8.9	8.5
20~40	7.83	0.60	1.58	82.6	8.1	9.3
40~60	7.88	0.64	1.48	82.7	8.0	9.3

表 2 灌溉水质基本化学性质

Table 2 The basic chemical properties of irrigated water

灌溉水 Irrigation water	pH	EC	TN (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)
对虾养殖废水 W1	7.82	35.9	6.16	0.27	0.08	2.44	0.90	0.14
海参养殖废水 W2	7.65	31.2	4.92	0.31	0.14	1.76	0.43	0.09
大菱鲆养殖废水 W3	7.90	26.5	7.35	0.11	0.02	2.25	2.36	0.38

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 土壤盐化与碱化

土壤盐化是影响能源植物生长和产量的关键性障碍因子。异源海水养殖废水灌溉对土壤盐分的积聚有明显作用(图 1)。对虾(W1)、海参(W2)、大菱鲆(W3)养殖废水浇灌后, 耕层土壤盐分达到了 2.69、2.15 和 1.66 g/kg, 比不灌溉处理(CK1)分别高出 8 倍、6 倍和 4 倍多。而淡水灌溉(CK2)对土壤盐分淋洗作用不明显 ($P>0.05$), 土壤盐分仅比 CK1 低 0.017 g/kg。由此表明, 无论何种海水养殖废水灌溉, 均可引起土壤表层盐化过程。

钠吸附比(SAR)是衡量土壤或水体碱化的一项关键指标。SAR 值高, 往往会导致土壤粘土颗粒膨胀、分散, 因而失去相应的团粒结构。如图 2 所示, 菊芋生育期间, 异源养殖废水灌溉对 SAR 产生了显著影响。CK1 和 CK2 的 SAR 最小, 其值分别为 3.4 和 3.3 (mmol/L)^{1/2}。海水养殖废水灌溉条件下, 土壤耕层 SAR 显著增加, 尤其是海参养殖水处理, 其

值达到了 7.4 (mmol/L)^{1/2}; 大菱鲆和对虾养殖水处理 SAR 值较大, 较 CK1 分别增长了 1.1 和 0.8 倍。统计分析结果表明, 海参或大菱鲆废水与对虾废水处理间差异显著。因此, 海水养殖废水灌溉土壤存在碱化的风险, 尤其对于盐度较低的海参和大菱鲆养殖废水。

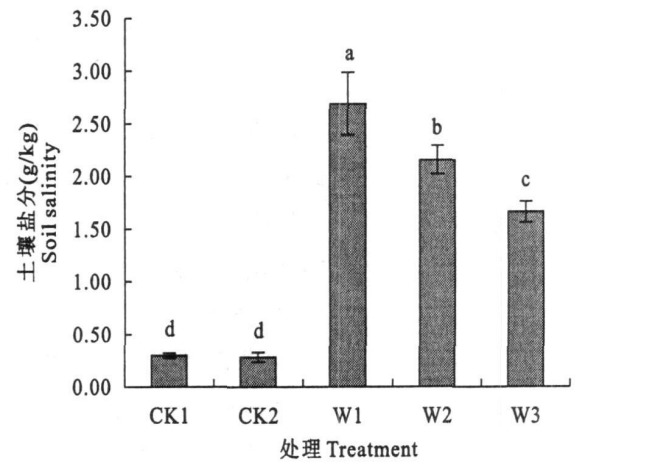


图 1 菊芋生育期异源海水养殖废水灌溉对土壤盐分的影响

Fig.1 The impact of heterologous aquaculture wastewater irrigation on soil salinity during the Jerusalem artichoke growing seasons

2.2 植物生长与产量

异源海水养殖废水灌溉对菊芋生物量(茎叶、根系)有明显影响(图 3)。淡水灌溉条件下, 地上部生

物量最高,达到了 0.358 kg/株;而不灌溉处理(CK1),菊芋地上部生物量明显下降,仅为淡水灌溉处理(CK2)地上部生物量的 83.2%。三个海水养殖废水灌溉处理,地上部生物量也分别较淡水处理下降了 22.1%(W1)、18.7%(W2)、16.8%(W3),表明高盐度的养殖废水对菊芋茎叶生长产生明显抑制作用。有趣的是,菊芋根系的生长规律与地上部分截然不同。干旱和盐分胁迫均促进了菊芋根系的生长,且两者具有同等效果。由此可见,干旱和盐分胁迫抑制了菊芋地上部茎叶的生长,却能促进根系的生长发育。

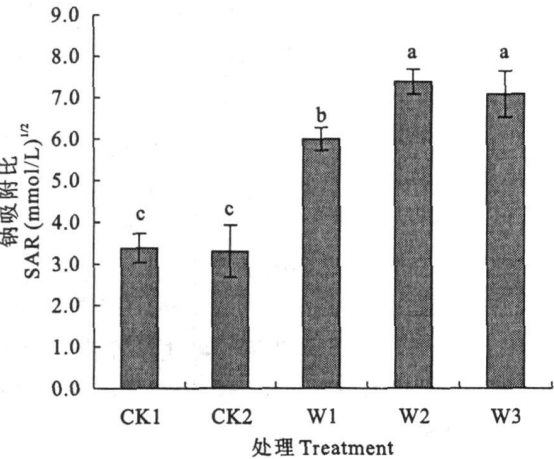


图 2 菊芋生育期异源海水养殖废水灌溉对土壤钠吸附比的影响

Fig.2 The impact of heterologous aquaculture wastewater irrigation on soil absorption ratios during the Jerusalem artichoke growing seasons

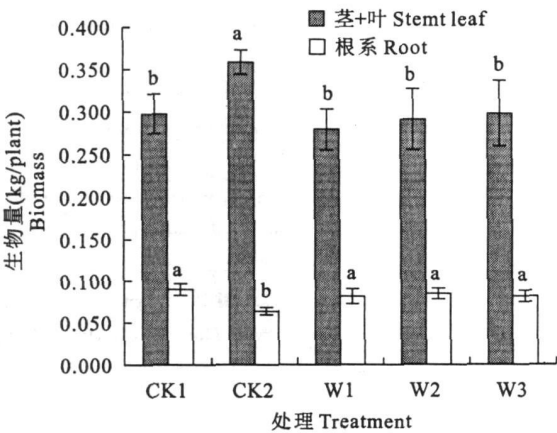


图 3 菊芋生育期异源海水养殖废水灌溉对生物量的影响

Fig.3 The impact of heterologous aquaculture wastewater irrigation on above- and under-ground biomass during the Jerusalem artichoke growing seasons

在华北平原的广大地区,干旱缺水无疑是影响作物产量的关键因素。如图 4 所示,不灌溉处理的

菊芋块茎产量 1.39 kg/株,比淡水处理菊芋块茎产量降低了 46.2%。与此同时,海水养殖废水灌溉对菊芋产量的形成也有一定影响。海水养殖废水灌溉条件下,菊芋块茎产量较不灌溉对照(CK1)明显提高,增幅最大的是大鲮鲆养殖废水,其次分别为海参和对虾养殖废水;三者分别增加了 79.0%、65.3%和 46.6%。与 CK2 相比,除对虾养殖废水因盐度较高影响菊芋块茎产量,其他两个养殖水灌溉处理对菊芋产量均无影响。因此,我们认为:在我国北方沿海缺水地区(华北平原),利用海水养殖废水补充灌溉耐盐能源植物(菊芋),在提高产量的同时,也为滨海盐碱地区生态环境以及海洋环境的改善提供了行之有效的途径。

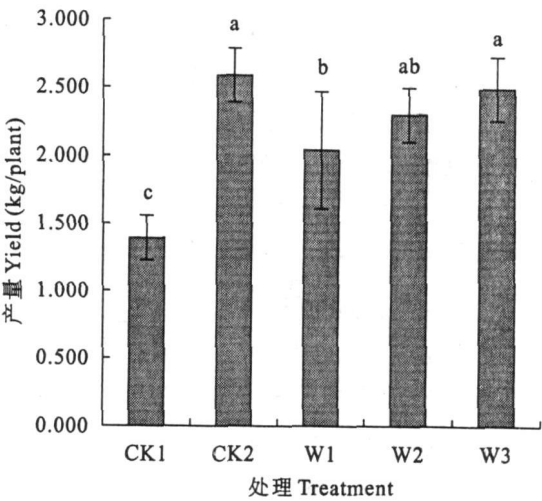


图 4 菊芋生育期异源海水养殖废水灌溉对产量的影响

Fig.4 The impact of heterologous aquaculture wastewater irrigation on the tuber yield at harvest

2.3 土壤-植物系统安全性评价

海水养殖废水灌溉条件下,作物的耐盐性可以用下述公式加以描述。公式中用到 4 个重要参数,即:作物相对产量(Y_r),临界耐盐值(a),在临界耐盐值基础上,每增加单位盐度作物相对产量下降的百分率(b),以及灌溉水电导率(EC_w),具体公式表述如下:

$$Y_r=100-b\left(EC_w-a \right)$$

菊芋相对产量与灌溉水矿化度之间的关系见图 5。结果表明:当海水养殖废水的矿化度达到 24.64 dS/m 时,菊芋块茎的相对产量呈线性下降趋势。因此,24.64 dS/m 为菊芋耐盐的临界点。超过这个临界点,每增加 1 个单位的电导率,菊芋块茎相对产量将下降 1.854%。由此,菊芋的耐盐性的表达式应为: $Y_r=100-1.854\left(EC_w-24.64 \right)$ 。

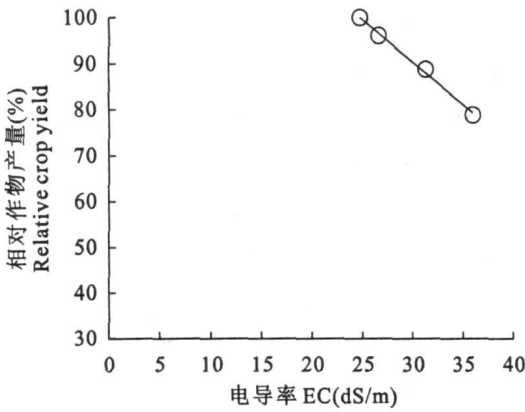


图 5 菊芋相对产量与灌溉水矿化度之间的关系
Fig.5 The relationship between relative yield of Jerusalem artichoke and irrigation water salinity

钠值是评价土壤安全性指标之一。在土壤溶液中钠浓度高时,土壤粘土矿物往往会膨胀分散,团粒结构也会遭到水解。无论是水解还是膨胀扩散,均会导致土壤渗透性减弱,因而土壤容易结壳和板结。因为盐分总浓度较高往往加强土壤聚合和渗透能力的稳定性,由此可区分含盐土壤和含钠土壤。含钠量是指吸附的可交换钠与阳离子交换量的比值,因而 SAR($SAR = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{1/2}$)常被作为土壤和水分钠危险指数,又称为碱化度。

图 6 列出了保持土壤渗透性的具有代表性的 SAR 基准值和渗水的电导率。由图 2 可知,菊芋表土的 SAR 小于 $7.4 \text{ (mmol/L)}^{1/2}$,那么只要土壤渗漏水的电导率为 1.0 dS/m ,均能确保土壤理化安全。由此我们可以判断:本试验中,异源养殖废水具有较高的盐度,因此灌溉后并没有引起土壤碱化和渗透性问题。

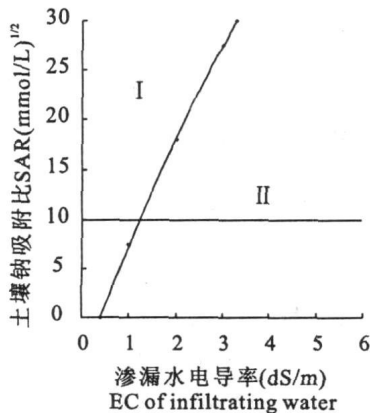


图 6 保持土壤渗透率的表土 SAR 基准值和渗水 EC 基准值(据 Rhoades, 1982)

Fig.6 Threshold values of SAR of topsoil and EC of infiltrating water for maintenance of soil permeability (after Rhoades, 1982)

3 讨论

咸水灌溉对土壤的某些理化性状(如 EC、SAR 等)会产生重大影响,而这些理化性状同土壤安全息息相关^[9]。土壤电导率(EC)增加会直接导致作物盐害,而土壤钠吸附比(SAR)的增加往往会引起土壤碱化以及土壤结构破坏、入渗性能下降等不良反应^[10,11]。因此在咸水灌溉领域,对土壤-植物系统安全的研究尤为关键。

海水养殖废水在某些理化性质上等同于滨海地区其它咸水资源(如海水、地下咸水等),但因其富含营养盐物质,在海水灌溉农业(Seawater irrigation agriculture)方面有独特意义。通过本试验,系统比较了三种异源海水灌溉养殖废水效应,尽管土壤盐分明显积聚,但 SAR 值较小($7.4 \text{ (mmol/L)}^{1/2}$),仍在安全范围之内。海参和大鳞鲂养殖废水其盐度低于对虾养殖废水,因此取得了较高的块茎产量,且与淡水处理相比,均没有明显差异,由此表明上述两种养殖废水可以代替淡水用于菊芋生产。

对菊芋耐盐性的率定,是为了更准确地指导实践生产。试验结果表明,菊芋的耐盐临界值为 24.65 dS/m ,相当于 45% 海水浓度;这一结果与先前多年田间生产的结果基本吻合^[12]。

通过以上综合研究,我们初步认为:在滨海盐渍区,利用异源海水养殖废水发展生物质能源植物—菊芋是基本可行的,但仍需在区域生态安全方面作进一步系统研究。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑部. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [2] Lekang O, Bomo A M, Svendsen I. Biological lamella sedimentation used for wastewater treatment [J]. Aquacultural Engineering, 2001, 24, 115—127.
- [3] Jed Brown J, Glenn E P. Reuse of highly saline aquaculture effluent to irrigate a potential forage halophyte Suaeda esteroa [J]. Aquacultural Engineering, 1999, 20, 91—111.
- [4] Jones A B, Dennison W C, Preston N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study [J]. Aquaculture, 2001, 193, 155—178.
- [5] Hans B. How green are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment system [J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(3): 45—50.
- [6] 刘兆普, 隆小华, 刘 玲, 等. 海岸带滨海盐土资源发展能源植物资源的研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 9—14.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[9] Rhoades J D. The use of saline water for crop production—FAO irrigation and drainage paper 48[M]. Roman: FAO, 1992.

[10] Lauchli A, Epstein E. Plant response to saline and sodic conditions [C]//Tanji K K. Agricultural Salinity Assessment and Management. New York: American Society of Civil Engineers, 1990: 113—137.

[11] De Pascale S, Barbieri G. Effects of soil salinity from long-term irrigation with saline-sodic water on yield and quality of winter vegetable crops[J]. Scientia Horticulturae, 1995, 64: 145—157.

[12] Zhao G M, Liu Z P, Chen M D, et al. Soil properties and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) with seawater irrigation in North China Plain[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 195—202.

Studies on the use of saline heterologous aquaculture wastewater to develop biofuel plant (Jerusalem artichoke) in salinized coastal areas

ZHAO Geng-mao, LIU Zhao-pu^{*}, WANG Hui, ZHANG Bo

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: A field-trial was conducted on the use of agricultural wastewater to the salt-tolerant energy plants (Jerusalem artichoke) cultivation; meanwhile, soil properties, plant growth and yield were investigated, and than water-suit visual model was used to the security assessment on the soil-plant systems. The results showed that: heterologous wastewater irrigation could cumulate salts obviously, particularly for the high salinity of the prawn wastewater; the soil salinity was as high as 2.69 g/kg; and soil alkalization (SAR) in sea cucumber aquaculture wastewater was the highest, and its value reached 7.4 (mmol/L)^{1/2}. Stem and leaf growth of Jerusalem artichoke was inhibited under the aquaculture wastewater irrigation, but root growth could be promoted. Compared with fresh water irrigation, in addition to shrimp wastewater because of high salinity affecting Jerusalem artichoke tuber production, the yield in other two aquaculture wastewater irrigation treatments had no impacts on the Jerusalem artichoke production. The results further show that, provided the Jerusalem artichoke tuber yield as a benchmark, the threshold salt tolerance of the Jerusalem artichoke was 24.65 dS/m, and aquaculture wastewater for irrigation does not pose a threat to soil alkalization. Therefore, agreeable salinity of aquaculture water could be used to irrigate Jerusalem artichoke with high yield as well as soil safety.

Keywords: aquaculture wastewater; salt-tolerant energy plants; salt; alkalization; growth; yield; safety