

海水养殖废水灌溉条件下 SPAC 系统中水盐肥 通量研究*

赵耕毛 刘兆普[†] 陈铭达 寇伟锋

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 2004 年 4 月~ 10 月, 在半湿润的莱州地区布置蒸渗试验, 研究海水养殖废水灌溉条件下 SPAC 系统水盐肥通量。试验设 5 个处理, 分别为 CK(种作物, 不灌溉) 和淋洗分额(LF) 为 0.1、0.2、0.3、0.4 的海水养殖废水灌溉处理。结果表明: 对于淋洗分额为 0.1、0.2、0.3、0.4 的海水灌溉处理, 用于土壤蒸发和作物蒸腾的海水养殖废水量分别占菊芋生育期总蒸散量的 36.5%、36.2%、37.0%、37.3%; 对于上述海水养殖废水灌溉处理, 土壤耕层的盐分积累量分别为 91.1、94.1、98.7、107.1 g; 而铵态氮的积累量分别为 2.00、2.29、2.27、2.82 mg, 硝态氮的积累量分别为 1.81、1.40、1.29、0.92 mg, 活性磷酸盐的积累量分别为 3.03、2.68、2.44、1.67 mg。因此, 认为海水养殖废水灌溉在供给作物水分和养分方面起到积极作用, 但需采取调控措施以防耕层土壤盐分过量积累。

关键词 海水养殖废水; 水盐肥通量; 淋洗分额

中图分类号 S153.5; S275.3 文献标识码 A

海水养殖废水是海水高位养殖过程中产生的, 其主要特征是盐度高且富含氮、磷等营养盐类。如果将海水养殖废水不加任何处理直接向海洋排放, 必然会导致近海海域水质恶化和赤潮的频繁发生^[1~2]。目前, 如何解决海水养殖废水的污染问题已受到各国政府部门的普遍关注。美国环境保护局(USEPA) 已经制定了海水养殖业的一系列操作规范, 并已于 2004 年 6 月 30 日开始在美国国内加以实施^[3]。巴西、墨西哥、印度、泰国等也相继出台了相关法律条文, 以限制海水养殖废水的直接排放和规范渔业生产。

发达国家凭借其雄厚的经济实力, 对养殖户加大经济投入, 帮助其建立过滤池、沉淀池等工程措施, 对养殖废水进行净化处理, 使其能够达标排放^[4~6]。而发展中国家通过工程设施处理海水养殖废水不十分现实。根据我国国情, 建立海水农业渔业复合体系, 通过其内部净化机制, 实现海水农业、渔业以及海洋环境互赢的目的, 是我国沿海农村经济可持续发展的有效途径之一。本文旨在计算海水养殖废水灌溉条件下土壤-植物-大气连续体

(SPAC) 的水盐肥通量, 评估海水养殖废水灌溉的可行性, 为海水养殖废水的农业利用提供实践和理论依据。

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, 年平均降雨量 550 mm, 平均蒸发量 2 116 mm。供试作物为菊芋(*Helianthus tuberosus* L.), 它的主要生物学特性是耐盐碱、耐贫瘠、耐旱、抗病虫。

供试土壤属脱盐砂壤土, 基本理化性质见表 1。试验设 5 个处理, 即 CK(种作物, 不灌溉) 和淋洗分额(渗漏水与灌溉水量之比) 为 0.1、0.2、0.3、0.4 的海水养殖废水灌溉处理。每处理重复 3 次, 按随机区组排列设计。2004 年 3 月底, 浅翻表层土壤(20 cm), 每钵施猪粪 0.2 kg。然后每钵播种 3 颗带 1 个芽眼的菊芋块茎, 2 周后定苗为 1 株。在菊芋块茎初始膨大期(6 月 21 日) 和块茎膨大后期(9 月 11

* 国家自然科学基金项目(30470331) 资助

[†] 通讯作者

作者简介: 赵耕毛(1975~), 男, 江苏海门人, 博士研究生, 主要从事近海资源利用与生态研究。E-mail: sea@njau.edu.cn

收稿日期: 2005-08-10; 收到修改稿日期: 2005-12-19

日), 用海水养殖废水灌溉 2 次。海水养殖废水电导率为 10.0 dS m^{-1} , 硝态氮、铵态氮和活性磷酸盐浓度分别为 0.58 、 0.14 和 0.26 mg L^{-1} 。已知淋洗分

(LF)、渗漏液体积(R)、土壤含水量(θ_1)和田间持水量(θ_2), 根据 $LF = R / (R + \theta_2 - \theta_1)$, 计算不同淋洗份额灌溉水需要量。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of soil used in this experiment

土壤层次 Soil layer (cm)	pH	总盐 Total soluble solids (g kg^{-1})	容重 Bulk density (g cm^{-3})	颗粒组成 Particle composition (%)		
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
				2~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm
0~ 20	7.58	0.21	1.27	82.6	8.9	8.5
20~ 40	8.26	0.31	1.58	82.6	8.1	9.3

1.2 试验装置

小型蒸渗装置主体部分由柱体和水箱构成(图 1)。柱体由 PVC 管制成, 内径 30 cm, 外径 32 cm, 高 45 cm。柱体下端用雕有小孔(垫入玻璃丝)的塑料盖封口。内装原状山东滨海轻盐土。柱体下方为盛接渗滤液的水箱, 边长 40 cm, 高 10 cm。在水箱侧面上下方各雕有一孔, 上孔用于通气, 下孔用于渗滤液流入收集瓶中。土面距柱体上缘 5 cm。在距土面 20 cm 处埋入时域反射仪(TDR), 以监测土壤水分动态变化。

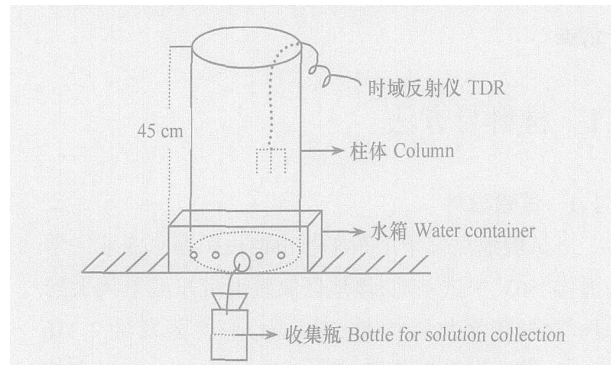


图 1 蒸渗装置示意图

Fig. 1 Lysimeter used in the experiment

1.3 测定方法

用电导率仪(SY-2 型)分析灌溉水与渗漏液的电导率, 再经公式换算得盐分浓度:

$$\text{盐分浓度}(\text{mg L}^{-1}) = \text{EC}(\text{dS m}^{-1}) \times 640^{[7]}$$

表 2 海水养殖废水灌溉下的水分通量计算

Table 2 Water flux of irrigation with saline aquaculture wastewater

处理 ¹⁾ Treatment	收入 Input (mm)		支出 Output (mm)		盈亏 Budget (mm)
	<i>I</i>	<i>P</i>	ET_c	<i>R</i>	ΔW
0.1	240.1	289.4	550.2	38.4	- 59.1
0.2	270.1	289.4	573.2	62.7	- 76.4
0.3	308.6	289.4	610.0	83.2	- 95.2
0.4	359.5	289.4	651.3	116.5	- 118.9

1) 淋洗份额 Leaching fraction (LF)

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 分别用靛酚蓝比色法、紫外分光光度法和钼蓝比色法^[8]。

2 结果与分析

2.1 水分通量

通常条件下, 在一定时间间隔内的土壤耕层水分平衡方程可表达为^[9]:

$$I + P + G = ET_c + R + \Delta W \quad (1)$$

式中, I 、 P 、 G 分别为灌溉水量、有效降水量和上升至耕层的毛管水量(mm); ET_c 、 R 、 ΔW 分别为实际作物蒸散量、深层渗漏量和土壤耕层水分变化量(mm)。本试验中, $G = 0$, 故式(1)简化为:

$$I + P = ET_c + R + \Delta W \quad (2)$$

在菊芋的关键生育期, 适当盐度的海水养殖废水及时补充灌溉对缓解旱情起到关键性作用。如表 2 所示, 部分海水养殖废水直接用于土壤蒸发和作物蒸腾。对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 用于土壤蒸发和作物蒸腾的海水养殖废水量分别占作物总蒸散量的 36.5%、36.2%、37.0%、37.3%。各海水养殖废水灌溉处理, 随着灌溉量的增加, 作物的蒸散量也明显增加($p < 0.05$), 且灌溉量与作物蒸散量之间存在显著的正相关关系($ET_c = 0.8573 I + 343.65$, $R^2 = 0.9986$)。

同样, 自然降水对缓解旱情也起到关键性作用。结果表明: 对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 用于土壤蒸发和作物蒸腾的有效降水量分别占总有效降水量的 94.1%、91.8%、88.4% 和 87.1%; 占总蒸散量的 49.5%、46.3%、41.9% 和 38.7%。试验结束时, 土壤耕层水分发生了不同程度的亏缺(但仍大于凋萎系数), 且随着作物蒸散量的增加, 其亏缺的量也明显增加($p < 0.05$)。作物蒸散量与耕层土壤水分亏缺量之间存在显著负相关关系($\Delta W = -0.5787 ET_C + 257.64, R^2 = 0.9958$)。

表 3 海水养殖废水灌溉下的盐分通量计算
Table 3 Salt flux of irrigation with saline aquaculture wastewater

处理 ¹⁾ Treatment	收入 Input		支出 ²⁾ Output			盈亏 Budget	
	$I(L)$	$C_i(g L^{-1})$	$R_1(L)$	$c_{r1}(g L^{-1})$	$R_2(L)$	$c_{r2}(g L^{-1})$	$\Delta z(g)$
0.1	16.96	6.40	1.33	3.68	1.38	9.13	91.1
0.2	19.08	6.40	2.02	3.58	2.41	8.67	94.1
0.3	21.80	6.40	2.39	3.99	3.49	8.97	98.7
0.4	25.44	6.40	4.24	4.26	3.99	9.43	107.1

1) 淋洗份额 Leaching fraction (LF); 2) R_1 、 c_{r1} 、 R_2 和 c_{r2} 分别指第 1 次灌溉后渗滤液体积、第 1 次灌溉后渗滤液浓度、第 2 次灌溉后渗滤液体积和第 2 次灌溉后渗滤液浓度 R_1 、 c_{r1} 、 R_2 and c_{r2} represent volumes and salt concentrations of leachate after the first and second events of irrigation, respectively

在菊芋的关键生育期, 海水养殖废水灌溉对土壤耕层盐分的平衡产生重要影响(表 3)。对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 因灌溉进入土体的总盐分分别达到了 108.5、122.1、139.5、162.8 g; 而深层渗漏的盐分分别为 17.5、28.1、40.8、55.7 g; 土壤盐分的净积累量分别达到了 91.1、94.1、98.7、107.1 g(合 2.9、3.0、3.1 和 3.4 $g kg^{-1}$ 土)。这表明, 海水养殖废水灌溉后, 土壤耕层的盐分发生了明显积累。然而, 从两次灌溉后的耕层土壤渗滤液的浓度来看($c_{r2} > c_{r1}$), 第 1 次灌溉所积累的盐分明显高于第 2 次灌溉所积累的盐分, 表明耕层土壤中盐分的积累有明显减小的趋势。

海水养殖废水灌溉后, 土壤耕层中盐分的收入与支出之间有着密切的关系, 因而会影响到整个土层的盐分平衡。随着灌溉水量的增大, 携入土壤耕层的盐分也明显增加, 但因深层渗漏淋洗出耕层的盐分也随之增加。本试验中, 耕层土壤的盐分收入与支出有明显的正相关关系($Y_{\text{支出}} = 0.7022X_{\text{收入}} - 58.027, R^2 = 0.9979$)。当满足 $C_{\text{灌溉}}/C_{\text{淋洗}} = LF$ 时, 耕层土壤中的盐分趋于平衡。

2.3 养分通量

一定时间间隔内的土壤耕层养分平衡方程可表

2.2 盐分通量

一定时间间隔内的土壤耕层盐分平衡方程可表达为^[9]:

$$Ic_i + Gc_g = Rc_r + \Delta z \quad (3)$$

式中, I 、 G 、 R 分别为灌溉水量、上升至耕层的毛管水量和深层渗漏量(L); c_i 、 c_g 分别为灌溉水的盐分浓度和上升毛管水的盐分浓度($mg L^{-1}$); c_r 、 Δz 分别为深层渗滤液的盐分浓度和土壤耕层盐分变化。同样, 本试验中 $G = 0$, 故式(3)可简化为:

$$Ic_i = Rc_r + \Delta z \quad (4)$$

达为:

$$In_i = Rn_r + \Delta u \quad (5)$$

式中, I 、 R 分别为灌溉水量、深层渗漏量(L); n_i 、 n_r 分别为灌溉水的养分浓度和深层渗滤液养分浓度($mg L^{-1}$); Δu 为土壤耕层养分变化。

海水养殖废水灌溉条件下, 耕层土壤的养分通量见表 4。对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 因灌溉携入耕层土壤的铵态氮(NH_4^+-N) 分别为 2.37、2.67、3.05、3.56 mg; 随深层渗漏淋洗出耕层土壤的铵态氮分别为 0.37、0.38、0.79、0.75 mg; 耕层土壤铵态氮的净积累量分别为 2.00、2.29、2.27、2.82 mg。

对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 因灌溉携入耕层土壤的硝态氮($NO_3^- - N$) 分别为 9.84、11.07、12.64、14.76 mg, 随深层渗漏淋洗出耕层土壤的硝态氮分别为 8.03、9.20、11.35、13.84 mg; 耕层土壤硝态氮的净积累量分别为 1.81、1.40、1.29、0.92 mg。

同样, 对于淋洗份额分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 的处理, 因灌溉携入耕层土壤的活性磷酸盐($PO_4^{3-} - P$) 分别为 4.41、4.96、5.67、6.61 mg, 随深层

渗漏淋洗出耕层土壤的活性磷酸盐分别为 1.38、2.28、3.23、4.95 mg; 耕层土壤活性磷酸盐的净积累量分别为 3.03、2.68、2.44、1.67 mg。以上结果表明,

耕层土壤能够保蓄部分海水养殖废水中的养分, 以供作物吸收和利用。

表 4 海水养殖废水灌溉下的养分通量计算

Table 4 Nutrient flux of irrigation with saline aquaculture wastewater

项目 Item	处理 ¹⁾ Treatment	收入 Input		支出 ²⁾ Output				盈亏 Budget Δu (mg)
		I (L)	n_i (mg L ⁻¹)	R_1 (L)	n_1 (mg L ⁻¹)	R_2 (L)	n_2 (mg L ⁻¹)	
NH ₄ ⁺ -N	0.1	16.96	0.14	1.33	0.25	1.38	0.03	+ 2.00
	0.2	19.08	0.14	2.02	0.14	2.41	0.04	+ 2.29
	0.3	21.80	0.14	2.39	0.30	3.49	0.02	+ 2.27
	0.4	25.44	0.14	4.24	0.11	3.99	0.07	+ 2.82
NO ₃ ⁻ -N	0.1	16.96	0.58	1.33	3.59	1.38	2.36	+ 1.81
	0.2	19.08	0.58	2.02	2.72	2.41	1.73	+ 1.40
	0.3	21.80	0.58	2.39	2.50	3.49	1.54	+ 1.29
	0.4	25.44	0.58	4.24	1.89	3.99	1.46	+ 0.92
PO ₄ ³⁻ -P	0.1	16.96	0.26	1.33	0.74	1.38	0.29	+ 3.03
	0.2	19.08	0.26	2.02	0.46	2.41	0.56	+ 2.68
	0.3	21.80	0.26	2.39	0.71	3.49	0.44	+ 2.44
	0.4	25.44	0.26	4.24	0.63	3.99	0.57	+ 1.67

1) 淋洗分额 Leaching fraction (LF); 2) R_1 、 n_1 、 R_2 和 n_2 分别指第 1 次灌溉后渗漏液体积、第 1 次灌溉后渗漏液浓度、第 2 次灌溉后渗漏液体积和第 2 次灌溉后渗漏液浓度 R_1 、 n_1 、 R_2 and n_2 represent volumes and nutrient concentrations of leachate after the first and second events of irrigation, respectively

3 讨论

在 SPAC 系统中, 部分海水养殖废水可直接用于土壤蒸发和作物蒸腾。各海水养殖废水灌溉处理, 用于土壤蒸发和作物蒸腾的海水养殖废水量均占作物总蒸散量的 30% 以上, 剩余部分海水养殖废水用于深层渗漏。SPAC 系统内海水养殖废水的消耗过程(作物蒸散), 相应地减少了向海洋直接排放的量, 从而有效缓解了海洋环境压力。

Jed Brown 等^[10] 采用耐盐植物作为生物过滤器去除海水养殖废水中的营养盐, 得到了很高的去除效率。其中总氮和无机氮的去除率达到了 98% 和 94%; 总磷和溶解性活性磷的去除率分别达到了 99% 和 97%。本试验研究结果表明: 在菊芋的关键生育期用海水养殖废水灌溉 2 次, 土壤中的铵态氮、硝态氮及活性磷酸盐有所增加, 表明土壤耕层截获了海水养殖废水中的部分养分, 而且这部分养分可被作物迅速吸收利用, 成为作物的有效肥源。McIntosh 等^[11] 研究结果证实, 用海水养殖废水灌溉小

麦, 可以节省氮肥 20% ~ 31%。Hussain 等^[12] 指出, 含 N 40 mg L⁻¹ 的废水灌溉可以节省 50% 氮肥, 但仍要在充分了解灌区水盐特征的条件^[13], 采取合理的灌溉措施, 如合理的淋洗分额和适宜的耐盐作物, 估计作物的水分需要量、采用先进的灌溉方法和施用适量的化肥^[14] 等。硝态氮是易被淋洗的速效态养分^[15], 因此灌溉后应及时采取地面覆盖等措施, 提高其有效性, 从而可以进一步节省氮肥施用量。

海水养殖废水灌溉后, 土壤盐分是否积累, 是评价土壤安全的重要指标之一。一般而言, 对于任何一种土壤介质, 海水养殖废水灌溉条件下, 土壤总盐分总会达到一个平衡点($C_{\text{灌溉}}/C_{\text{淋洗}} = LF$)。这个平衡点不仅取决于土壤介质的物理性质(如结构、机械组成等), 同时也取决于灌溉水的盐度。本文的研究结果表明, 海水养殖废水灌溉增加了土壤盐分, 这是由于初始土壤含盐量较低且尚未达到平衡点所致。以往的海水灌溉试验结果表明, 莱州地区 50% 的海水灌溉菊芋, 土壤盐分可达到终年平衡, 其块茎产量仍高于不灌溉处理。海水养殖废水灌溉后土壤是否安全, 仍有待长期的大田试验加以佐证。

参考文献

- [1] 张福绥. 21 世纪我国的蓝色农业. 中国工程科学, 2000, 24(12): 30~ 34. Zhang F S. Blue agriculture of China in 21st century (In Chinese). Engineering Science, 2000, 24(12): 30~ 34
- [2] 杨蕾, 舒廷飞, 温琰茂, 等. 我国海水养殖及其可持续发展对策. 水产科学, 2003, 22(4): 45~ 48. Yang L, Shu T F, Wen Y M, et al. Countermeasures on sustainable development of mariculture in China (In Chinese). Fisheries Science, 2003, 22(4): 45~ 48
- [3] Boyd C E. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. Aquaculture, 2003, 226(1/4): 101~ 112
- [4] Teichert-Coddington D R, Rouse D B, Potts A, et al. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. Aquacultural Engineering, 1999, 19(3): 147~ 161
- [5] 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. Aquaculture, 2001, 193: 155~ 178
- [6] Jackson C J, Preston N, Burford M A, et al. Managing the development of sustainable shrimp farming in Australia: The role of sedimentation ponds in treatment of farm discharge water. Aquaculture, 2003, 226 23~ 24
- [7] Rhoades J D, Kandiah A, Mashali A M. The use of saline waters for crop production. In: Irrigation and Drainage Paper 48, FAO, Rome, 1992. 2
- [8] 中国土壤学会编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 129~ 135. Soil Science Society of China. ed. Soil and Agro-chemistry Analysis (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999. 129~ 135
- [9] Beltran J M. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. Agricultural Water Management, 1999, 40: 183~ 194
- [10] Jed Brown J, Glenn E P. Reuse of highly saline aquaculture effluent to irrigate a potential forage halophyte, *Suaeda estroea*. Aquacultural Engineering, 1999, 20: 91~ 111
- [11] McIntosh D, Fitzsimmons K. Characterization of effluent from an inland, low-salinity shrimp farm: What contribution could this water make if used for irrigation. Aquacultural Engineering, 2003, 27: 147~ 156
- [12] Hussain G, Al-Saati A J. Wastewater quality and its reuse in agriculture in Saudi Arabia. Desalination, 1999, 123: 241~ 251
- [13] 刘广明, 杨劲松, 姜艳. 江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究. 土壤, 2004, 37(2): 163~ 168. Liu G M, Yang J S, Jiang Y. Salinity characteristics of soils and groundwater in typical coastal area in Jiangsu Province (In Chinese). Soils, 2004, 37(2): 163~ 168
- [14] 隆小华, 刘兆普, 陈铭达, 等. 半干旱地区海涂海水灌溉菊芋盐肥耦合效应的研究. 土壤学报, 2005, 42(1): 91~ 96. Long X H, Liu Z P, Chen M D, et al. Coupling effect of salt and fertilizer application on *Helianthus tuberosus* irrigated with seawater in semi-arid region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 91~ 96
- [15] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Nitrate Leaching in an irrigated wheat-maize rotation field in the North China Plain. Pedosphere, 2005, 15(2): 196~ 203

STUDY ON FLUXES OF WATER, SALTS AND NUTRIENTS IN SOIL-PLANT-ATMOSPHERE CONTINUUM UNDER IRRIGATION WITH SALINE AQUACULTURE WASTEWATER

Zhao Gengmao Liu Zhaopu[†] Chen Mingda Kou Weifen

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

Abstract During April to October 2004, a lysimeter experiment was conducted in Laizhou region to study the fluxes of water, salts and nutrients in a Soil-Plant-Atmosphere continuum (SPAC) under irrigation with saline aquaculture wastewater. The experiment was designed to have five treatments: CK (plant without irrigation) and four treatments of irrigation with Leaching Fraction (LF) being 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4, respectively. Results show that in 4 treatments (LF = 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4), the irrigated water lost through evaporation from the soil and transpiration from the plants accounted for 36.5%, 36.2%, 37.0% and 37.3%, respectively, of the total evapotranspiration (ET_c) of Jerusalem artichoke throughout its growing season, the accumulation of salt reached 91.1, 94.1, 98.7 and 107.1 g, ammonium nitrogen 2.00, 2.29, 2.27 and 2.82 mg, nitrate nitrogen 1.81, 1.40, 1.29 and 0.92 mg and reactive phosphate 3.03, 2168, 2144 and 1167 mg, respectively in the root zone. In conclusion, irrigation with saline aquaculture wastewater may play an important role in applying Jerusalem artichoke with water and nutrients unless positive measures are taken to control the negative impact of over accumulation of salt.

Key words Saline aquaculture wastewater; Fluxes of water, salts and nutrients; Leaching fraction