



张稳乐,罗朝晖,吕璐,等. 水产养殖废水灌溉耐盐水稻对土壤和植物的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(2):264-273.  
ZHANG Wenle,LUO Zhaohui,LÜ Luhao,et al. Effects of irrigation of salt-tolerant rice with aquaculture wastewater on soil and plant[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(2):264-273.

## 水产养殖废水灌溉耐盐水稻对土壤和植物的影响

张稳乐<sup>1</sup>,罗朝晖<sup>1\*</sup>,吕璐<sup>1</sup>,江雨萌<sup>1</sup>,赵海燕<sup>1</sup>,陈丹<sup>2</sup>

(1.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏 南京 210095;2.河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

**摘要:**[目的]水产养殖废水可以作为替代性水源进行农业灌溉,本研究旨在分析不同浓度的水产养殖废水灌溉耐盐水稻对土壤、植物及生态经济效益的影响。[方法]以耐盐水稻为供试植物进行盆栽试验,设置淡水与水产养殖废水体积比1:1(DY)、水产养殖废水(Y)2种灌溉处理,以淡水(D)灌溉为对照,监测土壤理化性质变化情况、耐盐水稻生长及产量,以此为依据并结合稻田生态系统服务价值评估方法计算水产养殖废水灌溉耐盐水稻过程中产生的生态经济效益价值。[结果]水产养殖废水灌溉能够降低土壤pH值、提高土壤电导率(EC),同时水产养殖废水能够改善土壤物理性状,降低土壤容重,提高土壤孔隙度,改善土壤持水状况;水产养殖废水灌溉能够不同程度增加土壤有机质、全氮、全磷和速效磷含量,提高土壤肥力;与D灌溉相比,DY能有效增加耐盐水稻株高和生物量,提高耐盐水稻产量,增产达199%;D灌溉、DY灌溉、Y灌溉3种处理系统的生态经济效益按从大到小的处理依次为DY灌溉(30 532.08元·hm<sup>-2</sup>)、Y灌溉(20 980.63元·hm<sup>-2</sup>)、D灌溉(13 208.60元·hm<sup>-2</sup>)。[结论]淡水与水产养殖废水按体积比1:1混合灌溉能够改善土壤理化性质,增加土壤肥力,提高作物产量,并且可以带来较大的生态经济效益价值,为最优的灌溉模式。

**关键词:**水产养殖废水;灌溉;耐盐水稻;生态经济效益

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)02-0264-10

## Effects of irrigation of salt-tolerant rice with aquaculture wastewater on soil and plant

ZHANG Wenle<sup>1</sup>,LUO Zhaohui<sup>1\*</sup>,LÜ Luhao<sup>1</sup>,JIANG Yumeng<sup>1</sup>,ZHAO Haiyan<sup>1</sup>,CHEN Dan<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences,Nanjing Agricultural University,Nanjing 211100,China;

2.School of Earth Sciences and Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China)

**Abstract:**[Objectives]Aquaculture wastewater can be used as an alternative water source for agricultural irrigation. The purpose of this study was to analyze the effects of irrigation of saline-alkali tolerant rice with different concentrations of aquaculture wastewater on soil,plant and ecological economic benefits. [Methods]Salt-tolerant rice was used as the test plant for pot experiment. By setting freshwater and aquaculture wastewater( $V:V=1:1$ )(DY) and aquaculture wastewater(Y) irrigation treatments, and freshwater(D) irrigation was used as the control to monitor the changes of soil physical and chemical properties,the growth and yield of saline-alkali tolerant rice. Based on this,the ecological economic benefits value generated by aquaculture wastewater irrigation of saline-alkali tolerant rice was calculated combined with the evaluation method of paddy field ecosystem services. [Results]The irrigation of aquaculture wastewater could reduce the soil pH value and increase the soil electrical conductivity(EC),while the aquaculture wastewater could improve the physical properties of the soil,reduce the bulk density of the soil,improve the porosity of the soil,and improve the water holding status of the soil. Aquaculture wastewater irrigation could increase soil organic matter,total nitrogen,total phosphorus and available phosphorus contents in different degrees,and improve soil fertility. Compared with D irrigation,DY could effectively increase the height of saline-alkali tolerant rice,increase the biomass of saline-alkali tolerant rice,improve the yield of saline-alkali tolerant rice,and increase the yield by 199%. The ecological economic benefits generated by the three treatments were DY irrigation(30 532.08 yuan·hm<sup>-2</sup>),Y irrigation(20 980.63 yuan·hm<sup>-2</sup>),and D irrigation(13 208.60 yuan·hm<sup>-2</sup>) in the order of size. [Conclusions]Freshwater and aquaculture wastewater(1:1)could improve the physical and chemical properties of the soil,increase soil fertility,and crop yield,and bring greater ecological economic benefits value,which was the best irrigation mode.

**Keywords:**aquaculture wastewater;irrigation;salt-tolerant rice;ecological economic benefits

收稿日期:2023-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD0900703)

\*通信作者:罗朝晖,副教授,研究方向为水污染治理,E-mail:lzhui@njau.edu.cn。

滨海盐碱地是一种重要的后备土地资源,综合利用潜力巨大,具有极高的经济、社会和生态价值<sup>[1-3]</sup>,针对滨海盐碱地的改良开发是解决土地紧张问题的重要环节之一<sup>[4]</sup>。目前,滨海盐碱地主要有2种利用方式:一是通过种植耐盐植物来利用大面积的盐碱地;二是发展水产养殖业。随着水产养殖规模的不断扩大,养殖方式逐步向高密度集约化发展,在实际生产中养殖户向养殖水体投放大量人工饵料造成饲料过剩导致养殖水体自身污染,而这些水产养殖废水排放到周围水域环境中造成水体富营养化,也造成了水资源浪费<sup>[5-6]</sup>。

水资源短缺一直是中国农业持续发展的重要限制因素<sup>[7-8]</sup>。水产养殖废水可以作为灌溉的替代性水源,这是解决农业灌溉水源不足的重要而有效的措施<sup>[9]</sup>。利用水产养殖废水进行农业灌溉具有以下几个方面的优点:1)提供灌溉的水源,缓解水资源的紧缺<sup>[10]</sup>;2)为农作物的生长提供了必要养分(有机质、N、P、K等)<sup>[11]</sup>,提高土壤肥力,促进植物生长,很大程度上减少了化肥的施用<sup>[12]</sup>;3)利用土壤微生物和农作物的自身净化能力,进一步消除了水产养殖废水中的污染物。晏军等<sup>[12]</sup>研究了养殖池塘废水灌溉下稻田减量施肥试验,结果表明稻田系统可有效消除水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP,当减少施肥后稻田养分供应减弱时,水产养殖废水中的养分可以满足水稻的养分需求。Jung等<sup>[13]</sup>研究了再生废水灌溉对水稻生长和产量的影响,结果表明,与自来水灌溉相比,废水灌溉和再生废水灌溉显著增加水稻的穗长、穗数和产量,且废水灌溉提供的养分与水稻产量具有高度的相关性。Wang等<sup>[14]</sup>运用Meta方法分析养殖废水灌溉对作物产量的影响,结果表明,废水灌溉后作物平均产量增长了19.7%。养殖废水农用将资源利用和环境保护有机地结合在一起,不仅提高了经济效益,而且具有重大的生态经济效益<sup>[12]</sup>。

虽然目前水产养殖废水农用研究取得了一定的进展,但鲜少涉及农田净化水产养殖废水生态经济效益研究,因此,本研究采用生态系统价值核算方法对水产养殖废水灌溉稻田的生态经济效益进行了评价,以水产养殖废水灌溉耐盐水稻试验数据作为基础,量化水产养殖废水灌溉耐盐水稻所产生的生态经济效益价值,将该种植模式的生态经济效益界定为农产品生产、水源涵养、土壤有机质积累、营养物质循环、碳固定、氧气提供、空气净化、消纳水产养殖废水、维持生物多样性、提供美学景观。通过构建评估模型,探讨单位面积( $1\text{ hm}^2$ )淡水灌溉、淡水与水产养殖废水(体积比为1:1)灌溉、水产养殖废水灌溉3种灌溉模式产生的生态经济效益差异,为后续推广水产养殖废水灌溉模式提供借鉴和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2021年7—11月在江苏省南京市江宁区河海大学节水园进行,该地区属于亚热带季风气候,年平均气温 $17.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量 $1\ 106.5\text{ mm}$ ,相对湿度76%。供试土壤选自江苏省盐城市大丰区滩涂盐碱土,土壤pH8.17,盐含量为0.3%,有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为6.25、0.58、0.72和 $21.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷和速效钾含量分别为46.51和 $21.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验用水为人工配制的模拟水产养殖废水<sup>[15]</sup>,用 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 、 $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ 配制,配制后的水pH6.51,电导率(EC)为 $1\ 182\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为22.68、14.34和 $29.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,盐度为0.05%。

### 1.2 试验设计

选取长、宽、高分别为70、50、45 cm的聚乙烯塑料箱进行盆栽试验。每盆添加过筛后的风干土100 kg,种植前每盆施40 g复合肥作为基肥。按照不同的灌溉水质,试验设置3组处理,分别为淡水灌溉(D)、淡水和水产养殖废水(体积比为1:1)灌溉(DY)、水产养殖废水灌溉(Y),每组处理3个重复,每盆种植耐盐水稻15穴,每穴2株,穴间距约 $10\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 。每天通过量杯按照体积加水,每盆插入相同刻度的标尺保持2~3 cm水层。供试耐盐水稻品种为‘盐稻19号’,由江苏省东台沿海集团有限公司提供。

### 1.3 样品采集

待耐盐水稻成熟后,各盆随机采取10穴耐盐水稻,风干后测定有效穗、穗粒数、穗长、结实率、千粒重、产量。并随机采取5穴长势均匀的耐盐水稻,冲洗去除泥土,放置于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青30 min后 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,待测。

采用5点法采集耐盐水稻分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期的土样,取样深度为0~20 cm,土样充分混合后装袋,做好标记,带回实验室进行处理。将土样风干去除植物根系、石块,研磨过1 mm筛后,

分析土壤理化性质。

#### 1.4 指标测定

将耐盐水稻植株分为秸秆、籽粒和根3部分,采用浓硫酸-过氧化氢法消解后测定植株氮、磷、钾含量。采用AA3连续流动分析仪(SEAL AutoAnalyzer3, Germany)测定植株氮和磷含量;采用火焰光度法(Agilent 710 ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪)测定植株钾含量。

采用环刀法测定土壤容重和孔隙度,土壤孔隙度=(1-容重/比重)×100%;采用1:2.5土液比浸提法,pH计测定土壤pH值;采用电导率仪测定电导率(EC);采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质(SOM)含量;采用AA3连续流动分析仪测定土壤全氮(TN)、全磷(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量;采用0.5 mol·L<sup>-1</sup>NaHCO<sub>3</sub>浸提-紫外分光光度法(PE EnSight 多功能检测系统)测定有效磷含量;采用1 mol·L<sup>-1</sup>醋酸铵浸提-火焰光度法(Agilent 710 ICP-OES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪)测定速效钾含量。

采用Microsoft Excel 2010软件进行数据初处理;采用SPSS 21.0软件进行统计方差分析,采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验( $P < 0.05$ ),采用Origin 2021软件绘图。

#### 1.5 生态经济效益核算方法

参考生态系统生产总值核算技术<sup>[16]</sup>,从生态系统调节服务价值和文化服务价值两方面核算生态系统生态经济效益。调节服务主要包括水源涵养、土壤有机质积累、碳固定、氧气提供、空气净化、水质净化、消纳废弃物、维持生物多样性;文化服务主要包括休闲旅游、景观价值。生态经济效益各指标核算方法见表1。

表1 生态经济效益指标核算方法

Table 1 Ecological economic benefits index calculation method

核算指标 Accounting indices	核算方法 Accounting methods	目标函数 Objective function	各符号含义 Meaning of each symbol
提供农产品价值 <sup>[17]</sup> Provide value for agricultural products	市场价值法 Market value method	$V_1 = L_r \times T_r + L_s \times T_s$	$V_1$ :农产品经济价值(元·kg <sup>-1</sup> ) The economic value of agricultural products $L_r$ :稻谷产量(kg) Yield $T_r$ :稻谷市场价格,取2.84元·kg <sup>-1</sup> The market price of paddy $L_s$ :秸秆产量(kg) Straw production $T_s$ :秸秆价格,取0.5元·kg <sup>-1</sup> The price of straw
水源涵养价值 <sup>[17]</sup> Water conservation values	替代成本法 Replacement cost method	$V_2 = S \times h \times P \times \beta \times C$	$V_2$ :水源涵养价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Water conservation value $S$ :作物种植面积(hm <sup>2</sup> ) Crop acreage $h$ :耕层厚度(0.3 m) Thickness of cultivated layer $P$ :非毛管孔隙度(%) Non-capillary porosity $\beta$ :水容重(kg·m <sup>-3</sup> ) Water bulk density $C$ :水库蓄水成本,取 $1.36 \times 10^{-3}$ 元·kg <sup>-1</sup> <sup>[17]</sup> The cost of reservoir water storage
土壤有机质积累价值 <sup>[18]</sup> Soil organic matter accumulation values	机会成本法 Opportunity cost method	$V_3 = S \times h \times \rho \times SOM \times C_{SOM}$	$V_3$ :土壤有机质积累价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Soil organic matter accumulation value $S$ :作物种植面积(hm <sup>2</sup> ) Crop acreage $h$ :耕层厚度(0.3 m) Thickness of cultivated layer $\rho$ :土壤容重(kg·m <sup>-3</sup> ) Soil bulk density $SOM$ :土壤有机质含量(g·kg <sup>-1</sup> ) Soil organic matter content $C_{SOM}$ :土壤有机质价格(元·kg <sup>-1</sup> ),取0.0513元·kg <sup>-1</sup> <sup>[19]</sup> The price of soil organic matter
营养物质积累价值 <sup>[18]</sup> Nutrient accumulation values	影子价格法 Shadow price method	$V_4 = L \times (C_N + C_P) \times P$	$V_4$ :营养物质循环价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Cycle value of nutrients $L$ :耐盐水稻各组织生物量(kg·hm <sup>-2</sup> ) Biomass of each tissue of salt-tolerant rice $C_N$ :N的比例 Percentage of nitrogen $C_P$ :P的比例 Percentage of phosphorus $P$ :化肥的平均价格,取4.155元·kg <sup>-1</sup> The average price of chemical fertilizer

续表 1 Table 1 continued

核算指标 Accounting indices	核算方法 Accounting methods	目标函数 Objective function	各符号含义 Meaning of each symbol
碳固定价值 <sup>[20]</sup> Carbon fixed values	市场价值法 Market value method	$V_5 = L \times 1.63 \times C_{CO_2} \times 0.272 \ 8$	$V_5$ :碳固定价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Carbon fixed value $L$ :耐盐水稻生物量(kg·hm <sup>-2</sup> ) Biomass of salt-tolerant rice $C_{CO_2}$ :碳单位价值,取 953.1 元·t <sup>-1</sup> <sup>[21]</sup> The unit value of carbon
氧气提供价值 <sup>[20]</sup> Oxygen provides values	市场价值法 Market value method	$V_6 = L \times 1.2 \times C_{O_2}$	$V_6$ :氧气提供价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Oxygen provision value $L$ :耐盐水稻生物量(kg·hm <sup>-2</sup> ) Biomass of salt-tolerant rice $C_{O_2}$ :氧气单位价值,取 400 元·t <sup>-1</sup> <sup>[21]</sup> The unit value of oxygen
空气净化价值 <sup>[22]</sup> Air purification values	校正系数法 Correction coefficient method	$V_7 = \sum Q_i \times F_i \times I$	$V_7$ :空气净化价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Air purification value $Q_i$ :单位面积农田吸收气体的量(kg·hm <sup>-2</sup> ) Amount of gas absorbed per unit area of farmland $F_i$ :处理污染气体成本 The cost of dealing with polluting gases $I$ :修正系数 Correction coefficients
消纳水产养殖废水价值 <sup>[23]</sup> Consumption of aquaculture wastewater values	治理费用法 Governance fee method	$V_8 = VOL \times P$	$V_8$ :消纳水产养殖废水价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Value of aquaculture wastewater consumption $VOL$ :试验中灌溉水产养殖废水量(m <sup>3</sup> ) Amount of wastewater from irrigated aquaculture in the test $P$ :处理水产养殖废水费用,取 1.67 元·m <sup>-3</sup> <sup>[23]</sup> The cost of treating aquaculture wastewater
生物多样性价值 <sup>[24]</sup> Biodiversity values	市场价值法 Market value method	$V_9 = \varepsilon \times C$	$V_9$ :生物多样性价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Biodiversity value $\varepsilon$ :维持生物多样性的单位面积价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Value per unit area of maintaining biodiversity $C$ :作物种植面积(hm <sup>2</sup> ) Crop planting area
景观价值 <sup>[25]</sup> Landscape values	市场价值法 Market value method	$V_{10} = \varepsilon \times C$	$V_{10}$ :景观价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Landscape values $\varepsilon$ :维持生物多样性的单位面积价值(元·hm <sup>-2</sup> ) Value per unit area of maintaining biodiversity $C$ :作物种植面积(hm <sup>2</sup> ) Crop acreage

## 2 结果与分析

### 2.1 水产养殖废水灌溉对土壤理化性质及养分的影响

**2.1.1 水产养殖废水灌溉对土壤容重和孔隙度的影响** 从表 2 可知,3 种不同灌溉用水处理下土壤容重差异不大,没有达到显著水平( $P>0.05$ )。D 灌溉和 Y 灌溉对土壤总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度的影响达到了显著性差异( $P<0.05$ ),与 D 灌溉相比,Y 灌溉土壤总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度分别显著增加了 10.7%、29.4%和 9.8%,而 DY 灌溉与 D 灌溉差异不显著( $P>0.05$ )。

表 2 水产养殖废水灌溉对土壤容重和孔隙度的影响

Table 2 Effects of aquaculture wastewater irrigation on soil bulk density and porosity

处理 Treatment	容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity	通气孔隙度/% Aeration porosity	持水孔隙度/% Holding porosity
D	1.30±0.04 <sup>a</sup>	43.63±1.94 <sup>b</sup>	2.01±0.24 <sup>b</sup>	41.62±1.70 <sup>b</sup>
DY	1.33±0.06 <sup>a</sup>	44.55±0.37 <sup>ab</sup>	2.01±0.17 <sup>b</sup>	42.54±0.20 <sup>b</sup>
Y	1.29±0.02 <sup>a</sup>	48.29±1.00 <sup>a</sup>	2.60±0.02 <sup>a</sup>	45.69±1.03 <sup>a</sup>

注:D、DY、Y 分别表示淡水、淡水与水产养殖废水(体积比为 1:1)、水产养殖废水。不同小写字母表示同一生育期差异显著( $P<0.05$ )。下同。D, DY, Y represent freshwater, freshwater+aquaculture wastewater (V:V=1:1), aquaculture wastewater. Values by the different small letter are significantly different at the level of 5% in the same growth period. The same below.

**2.1.2 水产养殖废水灌溉对土壤 pH 值和 EC 的影响** 从图 1 可知,在作物的整个生长过程中,D 灌溉对土壤 pH 值的影响不显著,而 DY 灌溉下土壤 pH 值在作物整个生长期呈逐渐减小的趋势,Y 灌溉下土壤 pH 值在作物整个生长期呈波动性减小的趋势。在作物整个生长过程中,D 灌溉对土壤 EC 的影响不明显,而 DY 灌溉下土壤 EC 在作物整个生长期呈逐渐增大的趋势,Y 灌溉下土壤 EC 在作物整个生长期呈波动

性增大的趋势。在作物的成熟期,与 D 灌溉相比,DY 灌溉和 Y 灌溉土壤 EC 增加了 74.7%和 58.1%,均达到显著性水平( $P<0.05$ )。

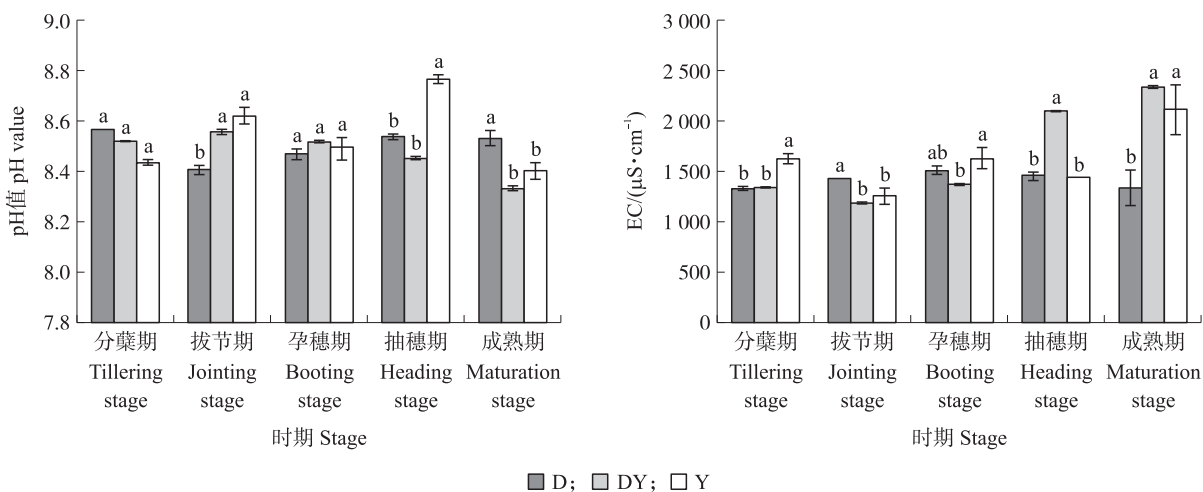


图 1 水产养殖废水灌溉对土壤 pH 值和 EC 的影响

Fig. 1 Effects of aquaculture wastewater irrigation on soil pH value and EC

2.1.3 水产养殖废水灌溉对土壤养分的影响 由图 2 可知,在作物整个生育期,与淡水灌溉相比,水产养殖废水灌溉不同程度提高土壤有机质、TN、TP、速效磷含量。3 种不同灌溉用水灌溉下土壤 TN 含量在作

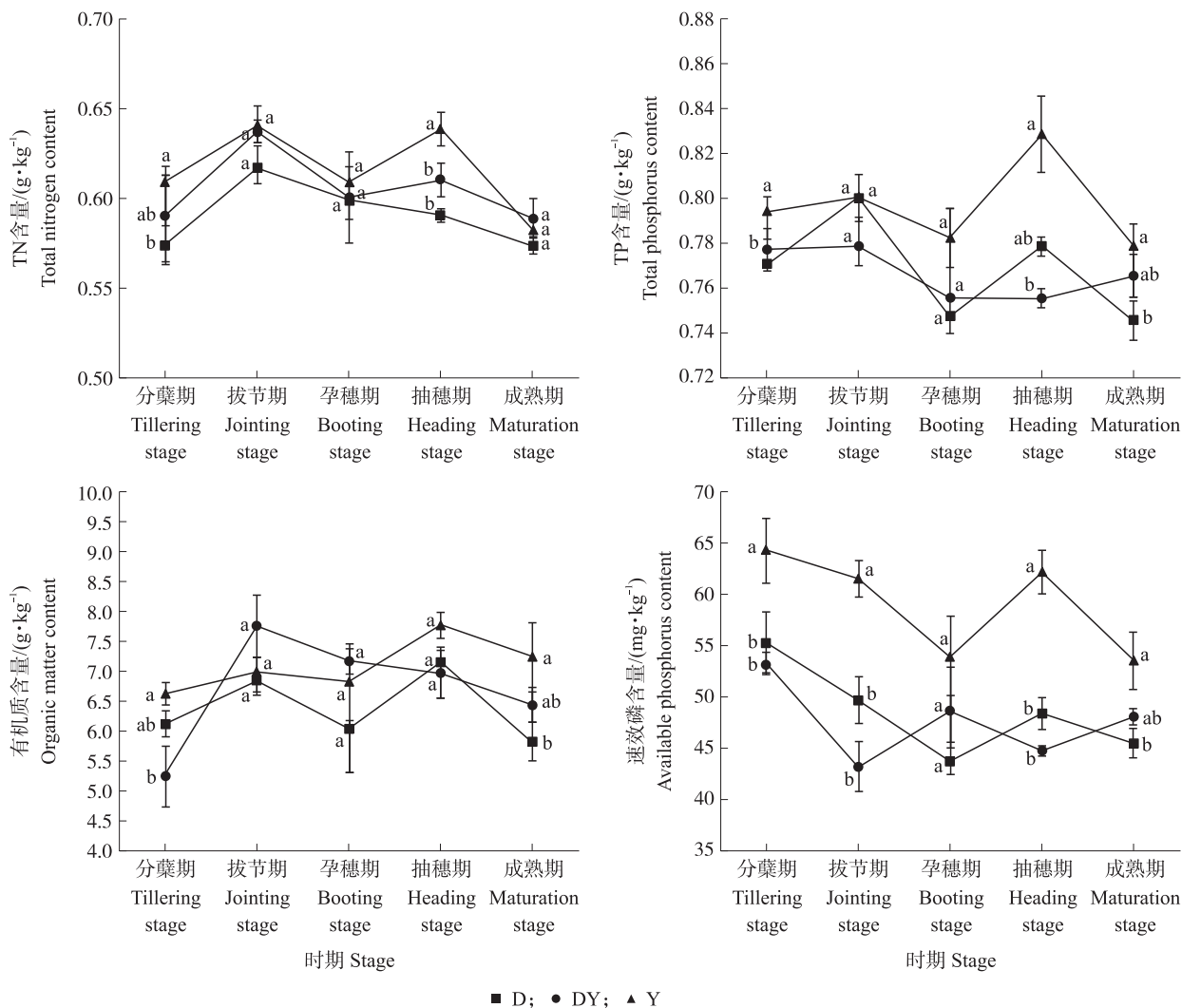


图 2 水产养殖废水灌溉对土壤养分的影响

Fig. 2 Effects of aquaculture wastewater irrigation on soil nutrients

物整个生长期呈先增加后降低再增加再降低的趋势。在作物分蘖期和抽穗期,与 D 灌溉相比,Y 灌溉下土壤 TN 含量分别显著增加 7.0%和 8.4%( $P<0.05$ )。但在作物成熟期,3 种不同灌溉用水灌溉对土壤 TN 含量的影响没有达到显著性差异( $P>0.05$ )。在作物整个生长过程中,DY 灌溉对土壤 TP 含量影响不明显,D 灌溉和 Y 灌溉下土壤 TP 含量均呈波动性降低的趋势。在作物成熟期,与 D 灌溉相比,Y 灌溉下土壤 TP 含量显著增加了 2.7%( $P<0.05$ )。在作物整个生长过程中,DY 灌溉下土壤有机质含量呈先增加后降低的趋势,D 灌溉下土壤有机质含量呈波动性降低的趋势,而 Y 灌溉下土壤有机质含量呈波动性增大的趋势。在作物成熟期,与 D 灌溉相比,DY 灌溉和 Y 灌溉下土壤有机质含量分别增加了 10.5%和 24.2%,其中 Y 灌溉达到显著性水平( $P<0.05$ )。D 灌溉和 DY 灌溉对土壤速效磷含量的影响不大,在作物分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期,与 D 灌溉相比,Y 灌溉下土壤速效磷含量显著增加了 16.4%、23.9%、28.5%和 17.7%。已有研究<sup>[26]</sup>表明,水产养殖废水灌溉后,土壤有机质得到了提升,土壤中氮、磷、速效磷等含量提高。

## 2.2 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻生长及产量的影响

**2.2.1 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻促生作用** 由图 3 可知,DY 灌溉条件下耐盐水稻株高、秸秆和籽粒生物量显著高于 D 灌溉和 Y 灌溉( $P<0.05$ )。在作物成熟期,DY 灌溉下耐盐水稻株高显著高于其他 2 组;与 D 灌溉相比,DY 灌溉耐盐水稻株高显著增加了 17.4%( $P<0.05$ );与 Y 灌溉相比,DY 灌溉耐盐水稻株高显著增加了 13.4%( $P<0.05$ )。与 D 灌溉相比,DY 灌溉下秸秆、根、籽粒生物量分别增加了 80.6%、87.7%、203%,Y 灌溉下秸秆、根生物量分别增加了 40.6%、233%,籽粒生物量减少了 22.9%。DY 灌溉下秸秆生物量分别是 D 灌溉、Y 灌溉的 1.80、1.28 倍,籽粒生物量分别是 D 灌溉、Y 灌溉的 3.03、3.93 倍。

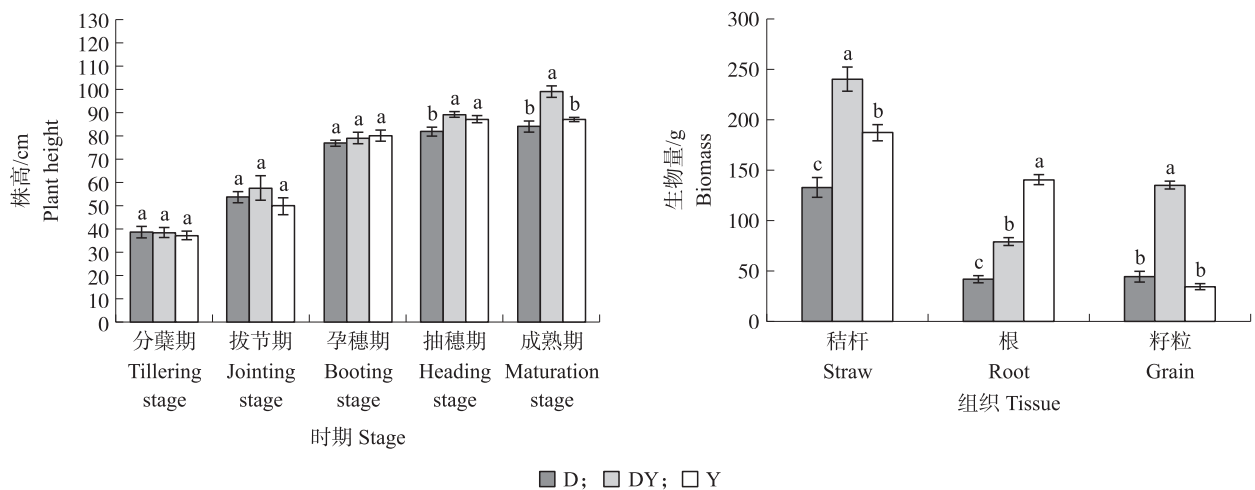


图 3 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻株高和生物量的影响

Fig. 3 Effects of aquaculture wastewater irrigation on plant height and biomass of sea rice

**2.2.2 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻氮、磷和钾含量的影响** 由图 4 可知,与 D 灌溉相比,DY 灌溉秸秆氮含量显著降低了 30.8%( $P<0.05$ ),Y 灌溉秸秆氮含量增加了 14.9%,但没有达到显著水平;与 D 灌溉相比,DY 灌溉秸秆磷含量显著降低了 42.1%( $P<0.05$ ),Y 灌溉秸秆磷含量显著增加了 36.2%( $P<0.05$ );与 D 灌溉相比,Y 灌溉根氮含量显著降低了 31.8%( $P<0.05$ );与 D 灌溉相比,DY 灌溉根磷含量显著增加了 29.9%( $P<0.05$ ),Y 灌溉根磷含量显著增加了 54.9%( $P<0.05$ )。随着水产养殖废水配比增加,耐盐水稻籽粒氮、磷含量均呈先降低后增加的趋势,与 D 灌溉相比,DY 灌溉籽粒氮含量显著降低了 40.4%( $P<0.05$ )。与 D 灌溉相比,DY 灌溉秸秆钾含量显著增加了 32.9%( $P<0.05$ ),而 DY 灌溉和 Y 灌溉对耐盐水稻根、籽粒钾含量的影响不大。

**2.2.3 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻产量及构成要素的影响** 从表 3 可知,3 种不同灌溉用水处理下耐盐水稻产量呈先增加后下降的趋势;与 D 灌溉和 Y 灌溉相比,DY 灌溉耐盐水稻产量显著增加了 199%和 294%;Y 灌溉与 D 灌溉相比降低了 24.1%。这主要归因于 DY 灌溉能有效提高耐盐水稻有效穗、穗粒数、穗长和千粒重。

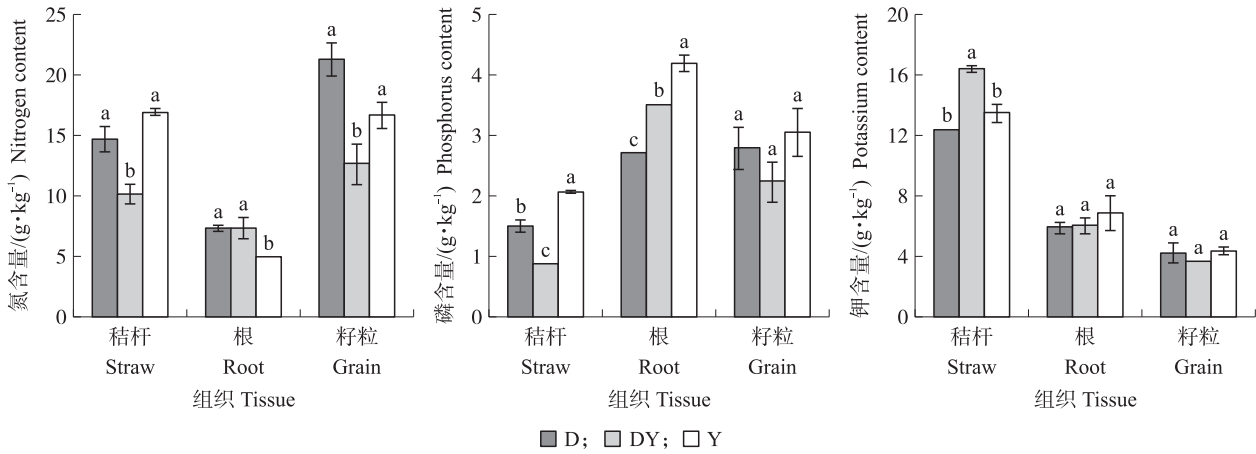


图4 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻氮和磷含量的影响

Fig. 4 Effects of aquaculture wastewater irrigation on nitrogen and phosphorus contents of salt-tolerant rice

表3 水产养殖废水灌溉对耐盐水稻产量及构成要素的影响

Table 3 Effects of aquaculture wastewater irrigation on the yield and components of salt-tolerant rice

处理 Treatment	产量/(kg·km <sup>-2</sup> ) Yield	有效穗/(10 <sup>4</sup> ·km <sup>-2</sup> ) Effective spike	单株穗粒数 Number of rice grains per plant	穗长/cm Ear length	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g Thousand kernel weight
D	135 934.87±265.39 <sup>b</sup>	10 689.66±12.17 <sup>b</sup>	128.35±7.34 <sup>b</sup>	20.74±0.32 <sup>b</sup>	63.25±4.66 <sup>ab</sup>	16.93±1.56 <sup>b</sup>
DY	406 463.46±234.67 <sup>a</sup>	21 214.39±19.12 <sup>a</sup>	180.95±8.43 <sup>a</sup>	22.02±0.22 <sup>a</sup>	74.95±3.26 <sup>a</sup>	23.08±1.75 <sup>a</sup>
Y	103 159.10±398.56 <sup>b</sup>	14 407.80±21.29 <sup>b</sup>	114.45±7.32 <sup>b</sup>	19.31±0.32 <sup>c</sup>	52.30±5.73 <sup>b</sup>	16.90±1.16 <sup>b</sup>

### 2.3 生态经济效益价值核算

根据1.5节核算方法,生态经济效益各指标价值见表4。D灌溉、DY灌溉、Y灌溉的生态经济效益分别为13 208.60、30 532.08和20 980.63元·hm<sup>-2</sup>。按不同灌溉处理生态经济效益总价值从高到低的处理依次是DY灌溉、Y灌溉、D灌溉。与D灌溉相比,DY灌溉的生态经济效益比D灌溉增加了131%,而Y灌溉增加了58.8%。D灌溉处理下,提供农产品价值、土壤有机质积累价值、碳固定价值、氧气提供价值所占权重较大,按从高到低依次为:提供农产品价值(42%)、氧气提供价值(23%)、碳固定价值(20%)、土壤有机质积累价值(9%)。DY灌溉处理下,提供农产品价值、碳固定价值、氧气提供价值、消纳水产养殖废水价值所占权重较大,按从高到低依次为:提供农产品价值(47%)、氧气提供价值(20%)、碳固定价值(18%)、消纳水产养殖废水价值(6%)。Y灌溉处理下,提供农产品价值、碳固定价值、氧气提供价值、消纳水产养殖废水价值所占权重较大,按从高到低依次为:提供农产品价值(26%)、氧气提供价值(24%)、碳固定价值(21%)、消纳水产养殖废水价值(18%)。

表4 生态经济效益指标价值

Table 4 Ecological economic benefits index value

元·hm<sup>-2</sup>

核算指标价值 Accounting indices value	处理 Treatment		
	D	DY	Y
提供农产品价值 Provide agricultural value	5 514.10	14 407.20	5 459.67
水源涵养价值 Water conservation value	82.01	91.39	106.08
土壤有机质积累价值 Soil organic matter accumulation value	1 164.41	1 316.14	1 435.38
营养物质循环价值 Nutrient recycling value	68.21	124.28	108.83
碳固定价值 Carbon fixed value	2 641.99	5 467.97	4 351.63
氧气提供价值 Oxygen provides value	3 010.75	6 231.17	4 959.02
空气净化价值 Air purification value	90.13	372.19	153.59
消纳水产养殖废水价值 Consume the value of aquaculture wastewater	0.00	1 884.71	3 769.43
维持生物多样性价值 Maintain biodiversity values	628.20	628.20	628.20
景观价值 Landscape value	8.80	8.80	8.80
合计 Total	13 208.60	30 532.08	20 980.63

## 3 结论与讨论

本研究结果表明,与常规淡水灌溉相比,水产养殖废水灌溉会降低土壤pH值,且随种植时间增加效

果更明显,可能是因为水产养殖废水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量较高,施入土壤中发生硝化反应,释放大量质子降低了土壤 pH 值。淡水与水产养殖废水(体积比 1:1)灌溉和水产养殖废水灌溉均可以增加土壤电导率,且随水产养殖废水比例的增加,效果更明显,这可能与水产养殖废水中含有大量盐离子有关。与常规淡水灌溉相比,水产养殖废水灌溉降低了土壤容重,增加了土壤持水孔隙度和通气孔隙度,可能是由于水产养殖废水促进土壤有机质的形成,给土壤微生物提供充足的原料和能源,因此能够改善土壤的孔隙度<sup>[27]</sup>。与常规淡水灌溉相比,水产养殖废水灌溉可有效增加土壤有机质、TN、TP、速效磷等养分含量,表明施用水产养殖废水在一定程度上可以代替肥料,改善土壤肥力<sup>[26]</sup>。

淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉能有效增加耐盐水稻株高和耐盐水稻生物量,比常规淡水灌溉分别增加了 17.4%、106%,比养殖废水灌溉分别增加了 13.4%、25.7%,这说明用一定配比的水产养殖废水灌溉可促进耐盐水稻的株高,增加耐盐水稻的生物量。与常规淡水灌溉相比,淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉下耐盐水稻产量增加了 199%,而水产养殖废水灌溉降低了 24.1%,这说明灌溉适宜浓度的水产养殖废水可以促进耐盐水稻产量,而浓度过高反而会降低产量。淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉下耐盐水稻的穗粒数和千粒重比常规淡水灌溉分别增加了 40.9%、36.3%,显著高于其他 2 组处理( $P < 0.05$ ),可能是因为淡水灌溉后土壤养分不足,导致耐盐水稻生长状态不佳,进而降低了耐盐水稻的穗粒数和千粒重。水产养殖废水灌溉同样导致耐盐水稻长势不好,可能是因为土壤肥力较大,产生烧苗现象,降低了耐盐水稻的穗粒数和千粒重。陈晓峰等<sup>[29]</sup>研究了养殖污水回用对水稻产量及土壤肥力的影响,结果表明水稻产量以中浓度污水追肥处理最高,为  $10\ 714\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比对照处理增产了 3.4%,说明一定浓度的污水灌溉配合追肥可增加水稻产量。养殖污水灌溉在一定程度上起到了增肥的作用,而且能有效提高稻田土壤中全氮、全磷、硝态氮和有机质含量。本研究以耐盐水稻为试验对象进行盆栽试验,结果表明用适宜浓度的水产养殖废水灌溉耐盐水稻一定程度上能够改善土壤理化性质,增加土壤肥力,提高耐盐水稻的产量,并且可以带来较大的生态经济效益。本研究采用的是盆栽试验,试验结果可能和大田试验存在差异,盆栽试验和大田水盐运动也有较大的区别,因此本研究在一定程度上具有局限性。

评估生态经济效益的各项指标中,提供农产品价值、碳固定价值、氧气提供价值、土壤有机质积累价值与消纳水产养殖废水价值所占比例较大。其中提供农产品价值、碳固定价值、氧气提供价值与作物产量息息相关。本研究结果表明,淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉耐盐水稻产生的生态经济效益约为  $30\ 532.08\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比常规淡水灌溉高  $17\ 323.48\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,比全水产养殖废水灌溉高  $9\ 551.45\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这说明在 3 种不同灌溉用水处理中淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉为最优的灌溉模式,主要是因为淡水与水产养殖废水(1:1)灌溉处理作物产量优于其他 2 组。马仕林等<sup>[28]</sup>探究了盐胁迫下接种丛枝菌根真菌对榉树的生长和光合特性的影响以及光响应模型的适用性,为利用菌根真菌技术提高植物在盐碱地中的生产力提供理论依据。本研究结果表明植物的生物量与生态经济效益呈显著正相关关系,说明生物量大小是限制生态经济效益的关键因素之一。本研究还存在一定的不足,生态经济效益评价中生物多样性价值和景观价值主要是根据前人研究的平均参数进行估算,并没有实际测定,结果有一定的不确定性,下一步研究将会对这部分数据进行详细测定,比较 3 种灌溉模式生物多样性价值和景观价值的差异,为后续的生态经济效益评价提供方法依据。

目前,国内外学者评估稻田生态经济效益大多数是依靠统计数据资料,并没有以试验数据为基础进行评估,而本研究设置水产养殖废水灌溉耐盐水稻试验,将稻田生态系统中的生态经济效益定量化,研究水产养殖废水资源化利用带来的生态价值,以期为水产养殖废水灌溉制度提供借鉴和理论支撑,为维护粮食安全和生态安全提供科学依据和参考模式,也为种植与养殖结合的生态经济效益评价提供技术借鉴。综上所述,本研究结合相关试验数据进行生态经济效益评估是可行的,可以为水产养殖废水资源化利用提供科学依据和参考。

#### 参考文献 References:

- [1] 李帅,杨敏,曹惠翔,等. 连年种植菊芋对滨海盐碱地的生态修复效果与机制[J]. 南京农业大学学报,2021,44(6):1107-1116. DOI: 10.7685/jnau.202104023.  
Li S, Yang M, Cao H X, et al. Ecological restoration effect and mechanism of continuous-year cultivation of Jerusalem artichoke on coastal saline-alkali land[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(6): 1107-1111 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33.

- Zhang C K, Chen X D. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition)*, 2016, 44(1): 25-33 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈君, 张长宽, 林康, 等. 江苏沿海滩涂资源围垦开发利用研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 213-219.  
Chen J, Zhang C K, Lin K, et al. Reclamation and development of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition)*, 2011, 39(2): 213-219 (in Chinese with English abstract).
- [4] Zhang Z, Song X C, Qiu Y, et al. Study on the exploitation and utilization of Jiangsu coastal tidal flat resources[J]. *Ocean Development and Management*, 2015, 32(3): 45-49.
- [5] 刘冉, 甘淳丹, 赵海燕, 等. 四种大型湿地植物对水产养殖废水中矿物质元素和重金属富集特征的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(5): 859-866. DOI: 10.7685/jnau.201701024.  
Liu R, Gan C D, Zhao H Y, et al. Accumulation characteristics of mineral nutrients and heavy metals in aquaculture wastewater by four species of large wetland plants. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(5): 859-866 (in Chinese with English abstract).
- [6] Zhao G M, Mehta S K, Liu Z P. Use of saline aquaculture wastewater to irrigate salt-tolerant Jerusalem artichoke and sunflower in semiarid coastal zones of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1987-1993.
- [7] 杨飞, 李爱宁, 周翠萍, 等. 兼业程度、农业水资源短缺感知与农户节水技术采用行为: 基于陕西省农户的调查数据[J]. *节水灌溉*, 2019(5): 113-116.  
Yang F, Li A N, Zhou C P, et al. Part-time employment, agricultural water shortage perception and water-saving technology adoption behavior of farmers: based on the survey data of farmers in Shaanxi Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(5): 113-116 (in Chinese with English abstract).
- [8] Becerra-Castro C, Lopes A, Vaz-Moreira I, et al. Wastewater reuse in irrigation: a microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health[J]. *Environment International*, 2015, 75: 117-135.
- [9] 廖林仙, 郭航, 黄俊, 等. 养殖废水灌溉对土壤易氧化碳与碳库管理指数的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2021(11): 123-127, 135.  
Liao L X, Guo H, Huang J, et al. The effects of livestock-farm wastewater irrigation on soil labile organic carbon and carbon management index [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(11): 123-127, 135 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下生物质炭和果胶对土壤盐碱化的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 16-23.  
Liu Y, Cui E P, Li Z Y, et al. Effects of irrigating biochar- and pectin-amended soil with treated municipal wastewater and swine wastewater on soil salinity and sodicity[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(6): 16-23 (in Chinese with English abstract).
- [11] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater: a case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(3): 310-322.
- [12] 晏军, 朱建强, 马艳, 等. 养殖池塘废水灌溉下稻田减量施肥试验研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6): 135-142.  
Yan J, Zhu J Q, Ma Y, et al. Research on reducing fertilization for paddy field under wastewater irrigation from aquaculture pond[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(6): 135-142 (in Chinese with English abstract).
- [13] Jung K, Jang T, Jeong H, et al. Assessment of growth and yield components of rice irrigated with reclaimed wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138: 17-25.
- [14] Wang H J, Wang J J, Yu X H. Wastewater irrigation and crop yield: a meta-analysis[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(4): 1215-1224.
- [15] 刘冉. 大型湿地植物对不同盐度水产养殖废水中多种污染物的吸收效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.  
Liu R. Studies of the absorption to various pollutant of large wetland plants in aquaculture wastewater with various salinity[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [16] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.  
Ouyang Z Y, Zhu C Q, Yang G B, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6747-6761 (in Chinese with English abstract).
- [17] 盛婧, 陈留根, 朱普平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1541-1545.  
Sheng J, Chen L G, Zhu P P. Evaluation of ecological service value of rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1541-1545 (in Chinese with English abstract).
- [18] Pu Y S, Chen J J, Zu Y Q, et al. Evaluation of the service function value of rice field ecosystem with different planting patterns in Erhai Lake basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 958-966.
- [19] Li F D, Yin C B. Assessment of the functions and ecological services values of green manure in paddy fields in South China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2): 327-336.
- [20] 刘利花, 尹昌斌, 钱小平. 稻田生态系统服务价值测算方法与应用: 以苏州市域为例[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 92-99.  
Liu L H, Yin C B, Qian X P. Calculation methods of paddy ecosystem service value and application: a case study of Suzhou City[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 92-99 (in Chinese with English abstract).
- [21] 薛宝林, 张路方, 张铁亮, 等. 稻田生态系统服务价值评价: 以湖南省为例[J]. *中国农村水利水电*, 2020(1): 52-57.  
Xue B L, Zhang L F, Zhang T L, et al. Evaluation of paddy field eco-system's service value: taking example Hunan Province for example[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(1): 52-57 (in Chinese with English abstract).
- [22] 唐衡, 郑渝, 陈阜, 等. 北京地区不同农田类型及种植模式的生态系统服务价值评估[J]. *生态经济*, 2008, 24(7): 56-59, 114.

- Tang H,Zheng Y,Chen F,et al. Ecosystem services valuation of difference croplands and cropping systems in Beijing suburb[J]. Ecological Economy,2008,24(7):56-59,114(in Chinese with English abstract).
- [23] 周锡跃,李凤博,徐春春,等. 浙江稻田人工湿地生态系统服务价值评估[J]. 浙江农业科学,2009,50(5):971-974.  
Zhou X Y,Li F B,Xu C C,et al. Evaluation on ecosystem service value of paddy field constructed wetland in Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2009,50(5):971-974(in Chinese with English abstract).
- [24] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.  
Xie G D,Xiao Y,Zhen L,et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2005,13(3):10-13(in Chinese with English abstract).
- [25] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.  
Xie G D,Zhang C X,Zhang L M,et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243-1254(in Chinese with English abstract).
- [26] 刘源,崔二苹,李中阳,等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤-植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报,2018,37(2):45-51.  
Liu Y,Cui E P,Li Z Y,et al. Differences of nutrient and heavy metals migration in soil-plant system irrigated by reclaimed water and livestock wastewater[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(2):45-51(in Chinese with English abstract).
- [27] 何运. 猪场养殖废水灌溉对土壤理化性质的影响[D]. 成都:成都理工大学,2012.  
He Y. The impact of pig farming waste water irrigation on soil physical and chemical properties [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2012(in Chinese with English abstract).
- [28] 马仕林,曹鹏翔,张金池,等. 盐胁迫下 AMF 对榉树幼苗生长和光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):122-130.  
Ma S L,Cao P X,Zhang J C,et al. Effects of AMF on the growth and photosynthetic characteristics of *Zelkova serrata* under salt stress[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2022,46(1):122-130(in Chinese with English abstract).
- [29] 陈晓锋,常志州,黄红英,等. 养殖污水回用对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 中国土壤与肥料,2009(2):39-42,70.  
Chen X F,Chang Z Z,Huang H Y,et al. Study on the effect of animal waste water reuse on rice yield and soil fertility[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2009(2):39-42,70(in Chinese with English abstract).

责任编辑:刘怡辰