

造纸废水灌溉黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地对土壤化学性质的影响

马欣¹, 夏孟婧^{2,3,*}, 陆兆华^{2,3,4}, 裴定宇², 刘志梅², 苗颖²

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083; 3. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州 256600;

4. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

摘要:造纸废水含有大量有机营养物质,可以用来恢复退化湿地。研究了处理后的造纸废水灌溉重度退化滨海盐碱湿地对土壤 pH 值、水溶性总盐、 Na^+ 、 Cl^- 以及营养成分的影响。结果表明:灌溉后土壤 pH 值略有升高,没有加重土壤碱化;土壤水溶性总盐、 Na^+ 、 Cl^- 分别比对照降低 9.61%—37.05%、3.16%—21.66%、5.38%—28.44%,且上层土壤降低率高于中下层土壤;土壤有机质、碱解氮、速效磷含量显著提高,增加率分别比对照高 13.68%—31.45%、30.01%—101.2%、1.08%—18.28%;速效钾含量没有显著提高。和正常芦苇湿地比较可知:灌溉后重度退化滨海盐碱湿地土壤化学性质得到改善,达到芦苇生长条件,可以进行芦苇湿地的恢复与重建。

关键词:造纸废水;灌溉;重度退化滨海盐碱湿地;土壤化学性质

The influence of irrigation with paper mill effluent on soil chemical properties of the heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta

MA Xin¹, XIA Mengjing^{2,3,*}, LU Zhaohua^{2,3,4}, PEI Dingyu², LIU Zhimei², MIAO Ying²

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta in Shandong Province, Binzhou 256600, China

4 Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: The paper mill effluent might be used for degraded wetlands restoration due to its abundant organic substances. Chemical properties including soil pH, total soluble salts, Na^+ , Cl^- and soil nutrients of a heavily degraded coastal saline-alkaline wetland were studied after irrigation with treated paper mill effluent. The result showed that the soil pH increased a little without leading to aggravation of the soil alkalization. Compared to the control, the total soluble salts, Na^+ and Cl^- decreased by 9.61%—37.05%, 3.16%—21.66% and 5.38%—28.44% respectively, and the reduction rates of upper soil layers were higher than those of the middle and lower layers. Irrigation of paper mill effluent significantly improved the soil organic matter, alkali-hydrolyzable N and available P with the increasing rates higher than the control by 13.68%—31.45%, 30.01%—101.07% and 1.08%—18.28% respectively. While available K did not rise significantly. A comparison with natural reed wetlands showed that irrigation with treated paper mill effluent could improve the soil property of the heavily degraded coastal wetland to the level suitable for reeds restoration and reed wetlands reconstruction.

Key Words: paper mill effluent; irrigation; heavily degraded coastal saline-alkaline wetland; soil chemical properties

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAC01A13);国家自然科学基金资助项目(30770412);山东省科技计划资助项目(2008-GG3NS07005, 2005GD42060003)。

收稿日期:2009-04-02; 修订日期:2009-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xmj19850912@163.com

黄河三角洲是我国三大三角洲之一,亦是开发最晚、最为年轻的三角洲。黄河三角洲湿地是在新构造运动、黄河泥沙沉积、当地降雨和径流以及潮流作用下发展起来的,主要分布在临海区域,以滩涂湿地为主,形成了一个宽广的扇带,整个三角洲湿地类型丰富,景观类型多样^[1-2]。但农业及油田开发对该区域湿地生态系统造成严重影响,湿地萎缩加速^[3],生态环境问题突出,严重影响到黄河三角洲区域及环渤海经济圈的生态安全。改良黄河三角洲退化滨海盐碱湿地,恢复其生态屏障功能意义重大。

黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地土壤主要是滨海盐土,盐分以 NaCl 为主,高盐分低养分土壤严重制约了湿地植物的生长,该区域年蒸发量远大于降水量,干旱缺水,加之地下水矿化度高无法使用,淡水资源匮乏,水已成为该区域退化湿地恢复的瓶颈。目前国内外学者研究了多种处理后废水、再生水灌溉土壤,结果表明可以起到改良土壤的效果^[4-7]。结合当地情况,本研究采用经过处理的造纸废水进行退化湿地灌溉^[8-9],一方面可作为淡水资源的补充,另一方面可为土壤提供有机营养物质和微量元素^[10-12],改善土壤性状,促进植物生长^[13-16]。灌溉造纸废水可有效降低黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地土壤盐分、提高土壤养分。土壤化学性质的改善为芦苇生长和湿地恢复与重建奠定了基础。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河三角洲地区沾化县北约 10km 处的退化滨海盐碱湿地(图 1)。该区域属东亚温暖带潮湿大陆季风性气候,年平均降水量约 600mm,年蒸发量 1800—2000mm,年平均气温 12.5℃。由于过度开采地下水引起的河口海水倒灌使该地区湿地土壤盐碱化,区域内土壤呈现出不同的盐碱化程度,本试验选取 1hm² 重度退化滨海盐碱湿地为试验区,该区域芦苇生长极少,为光板地,土壤表面有盐析出,这主要是海水倒灌和蒸发量大引起的。该区域土壤属于滨海潮土,土体构型多有厚黏层,基本性质见表 1。

1.2 试验方案设计

本试验采用处理后的造纸废水灌溉重度退化滨海盐碱湿地,造纸废水来自山东海韵造纸厂储存塘废水,该造纸厂废水处理工艺流程为:原水→调节塘→厌氧塘→好氧塘→兼性塘→储存塘。储存塘废水水质见表 2。

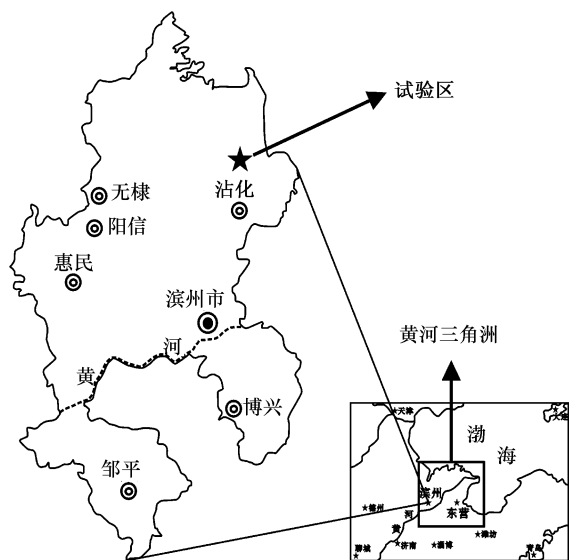


图 1 试验区位置

Fig. 1 Location of experimental region

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Soil property of the experimental region

指标 Index	pH	水溶性总盐/% Total soluble salt	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
数值 Value	7.892	2.304	7.791	11.36	8.092	272.9

表 2 储存塘废水水质情况

Table 2 Water quality of the storage pond

指标 Index	COD/(mg/L)	BOD/(mg/L)	pH	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	矿化度/(mg/L)
数值 Value	957	84	7.44	28.4	7.2	2080

对试验田进行分区(图 2),2007 年 8 月开始对各小区灌溉不同量造纸废水, A、B、C、D、E、F 小区分别灌溉废水 105、101、0、163.6、226.8、49.7 m³,相当于分别浇灌了 10、10、0、20、15、5cm 深度的废水。小区间的小

排碱沟以及两侧的主降渍沟用以排水。另外,各小区间都设有深埋 30cm 的土工布做隔离,以防相互影响。试验对 A 小区进行了翻耕,现不考虑 A,仅分析 B、C、D、E、F 小区。

1.3 实验方法与仪器

1.3.1 土壤样品采集

采样时间分别为 2007 年 5 月、2007 年 8 月、2007 年 11 月和 2008 年 3 月,小区土壤采样按 S 型设置 5 个采样点,每个采样点按剖面分 0—10cm,10—20cm,20—30cm 三层,将每个小区 5 个采样点土样分层均匀混合,装袋密封带回实验室。土样适当自然风干后磨碎,四分法剔除多余土样,过 2mm 筛,装袋密封保存用以测定各土壤指标。

1.3.2 测定方法^[17-18]

水质指标参照水和废水监测方法。用 pH 计法测定土壤 pH 值;用重量法测定土壤可溶性全盐;用 AgNO_3 法测定土壤 Cl^- ,用原子吸收分光光度法测定土壤 Na^+ ;用重铬酸钾容量法测定土壤有机质;用扩散法测定土壤碱解氮;用 0.5mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷;用 1mol/L 乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定土壤速效钾。

1.3.3 主要实验仪器

水质分析仪、Thermo Electron 原子吸收分光光度计、TU-1901 紫外可见光分光光度计、调温电热板、真空抽滤机、生化培养箱、鼓风干燥器、电子天平、水浴锅、恒温振荡器等。

1.4 数据分析

采用 Origin 软件作图;采用 SPSS 统计软件利用单因素方差分析 (ANOVA) 对实验数据差异性进行显著性分析,并且利用最小显著差异 (LSD) 多重比较方法分别对不同土壤深度之间和不同造纸废水灌溉量之间的两两差异性进行比较分析。

2 结果分析与讨论

2.1 造纸废水灌溉对土壤 pH 值的影响

造纸废水呈微碱性,pH 为 7.44,灌溉后使土壤 pH 值略有升高(图 3)。各试验小区 pH 本底值基本相同,均在 7.8—8.0 之间,灌溉废水后变化趋势基本一致,均在 2007 年 8 月上升到最大值,后来出现下降趋势,但到 2008 年 3 月仍比本底值稍高。各处理和对照组(灌溉 0cm)相比,除灌溉 10cm 在 2007 年 11 月 pH 值比对照稍低外,其余均比对照高,说明灌溉呈微碱性的造纸废水有使土壤 pH 值升高的趋势,但不同量造纸废水灌溉对土壤 pH 值的影响没有表现出显著差异。造纸废水 pH 虽然比试验区土壤本底值稍低,但灌溉后土壤 pH 有所升高,一方面是由于废水中的碱性物质被土壤胶体吸附、累积;另一方面灌水脱盐导致了土壤可溶性 Ca^{2+}

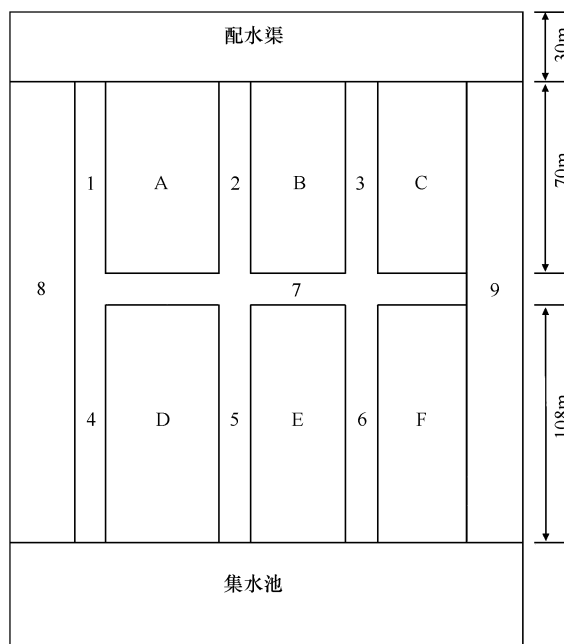


图 2 野外试验设计示意图

Fig.2 Schematic drawing of the design of outdoor experiment

图 1—7 为小排碱沟,8—9 为主降渍沟排水

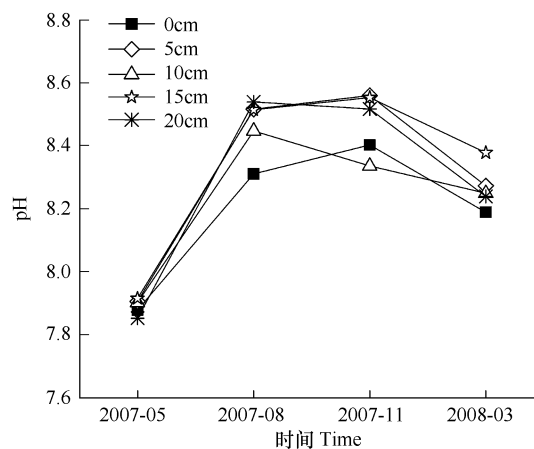


图 3 灌溉后土壤 pH 值变化情况

Fig.3 Change of soil pH after irrigation

的淋失,受溶度积支配的 CaCO_3 部分溶解,提高了溶液中 HCO_3^- 含量,从而引起土壤 pH 值的升高^[19]。

2.2 造纸废水灌溉对土壤水溶性总盐、 Na^+ 、 Cl^- 含量的影响

2.2.1 灌溉造纸废水后土壤水溶性总盐、 Na^+ 、 Cl^- 含量的动态变化

从图 4 可看出,试验土壤水溶性总盐本底含量达到 2.30%,为重度盐渍化土壤。2007 年 8 月灌溉造纸废水后,在造纸废水的冲洗作用下所有处理水溶性总盐含量均迅速降低,由于 8 月份正逢雨季,对照组水溶性总盐含量也大幅度降低,但除灌溉 5cm 外,其余处理降低量均高于对照,灌溉 20cm 处理水溶性总盐含量降低至 0.81%,比对照降低 37.05%;秋冬季节,降雨减少,土壤返盐,2007 年 11 月和 2008 年 3 月各处理水溶性总盐含量均上升,但仍明显低于本底水平,这是因为部分盐分通过降渍沟和排碱沟被排出样地,使整体水溶性总盐含量降低。

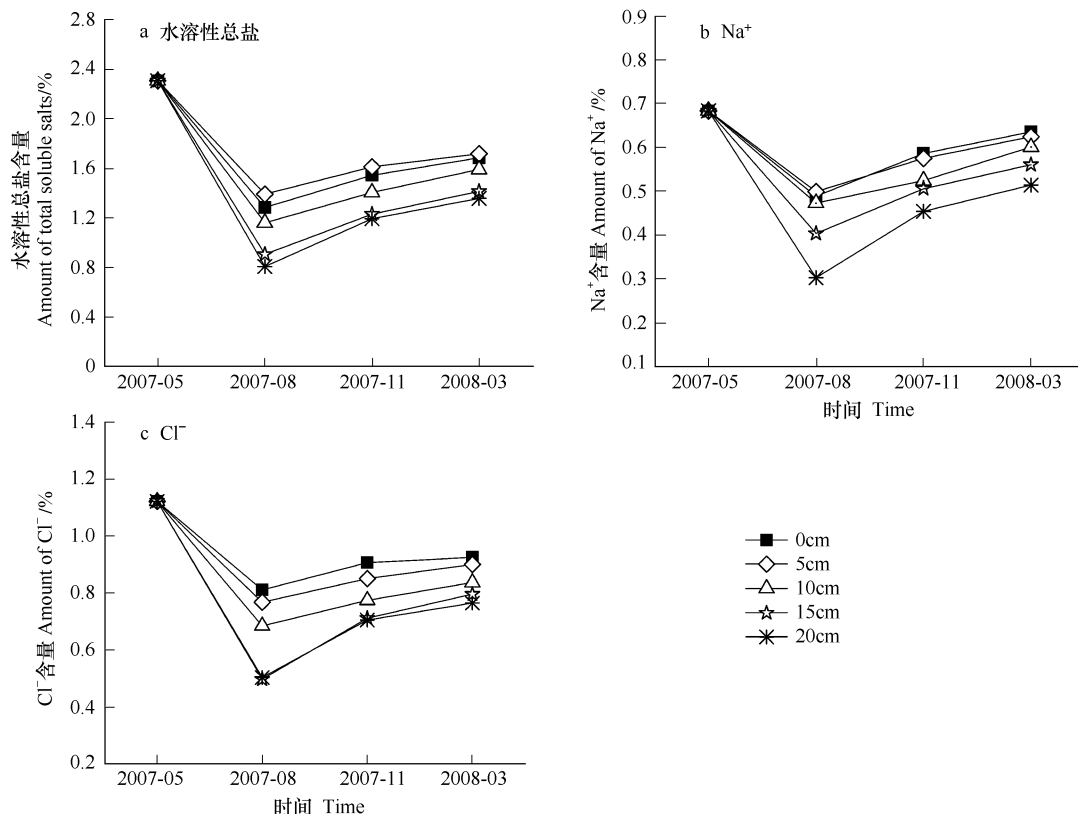


图 4 水溶性总盐, Na^+ , Cl^- 含量的动态变化

Fig. 4 Dynamic change of total soluble salts, Na^+ , Cl^-

Na^+ 和 Cl^- 的变化趋势和水溶性总盐一致,均是在 2007 年 8 月降到最低且灌溉 20cm 处理降低幅度最大,分别降低到 0.30%、0.50%,比对照降低 38.03%、37.90%;之后有所回升,但相对本底值仍有较大幅度降低。

2.2.2 不同造纸废水灌溉量对不同深度土壤盐分去除效果的影响

灌溉造纸废水后不同深度土壤水溶性总盐含量均迅速降低,图 5 为 2007 年 8 月灌溉废水后不同深度土壤相对土壤本底值的脱盐率、脱钠率和脱氯率。

结果表明,除灌溉 5cm 外,其余处理各层脱盐率均比对照高,说明造纸废水灌溉起到了压盐的作用。其中,上层土壤脱盐率,灌溉 10、15、20cm 均显著高于对照且灌溉 20cm 显著高于 10cm 处理;中层土壤脱盐率,灌溉 10、15、20cm 均显著高于对照但随着灌溉量的增加没有表现出显著差异;下层土壤脱盐率,只有灌溉 15cm 和 20cm 显著高于对照。还可看出,各处理上层土壤脱盐率均比中下层土壤高,一方面是因为表层土壤孔隙度比较大,盐分相对中下层可以较容易地被淋溶;另一方面土壤在返盐的作用下使盐分聚集在表层,形成

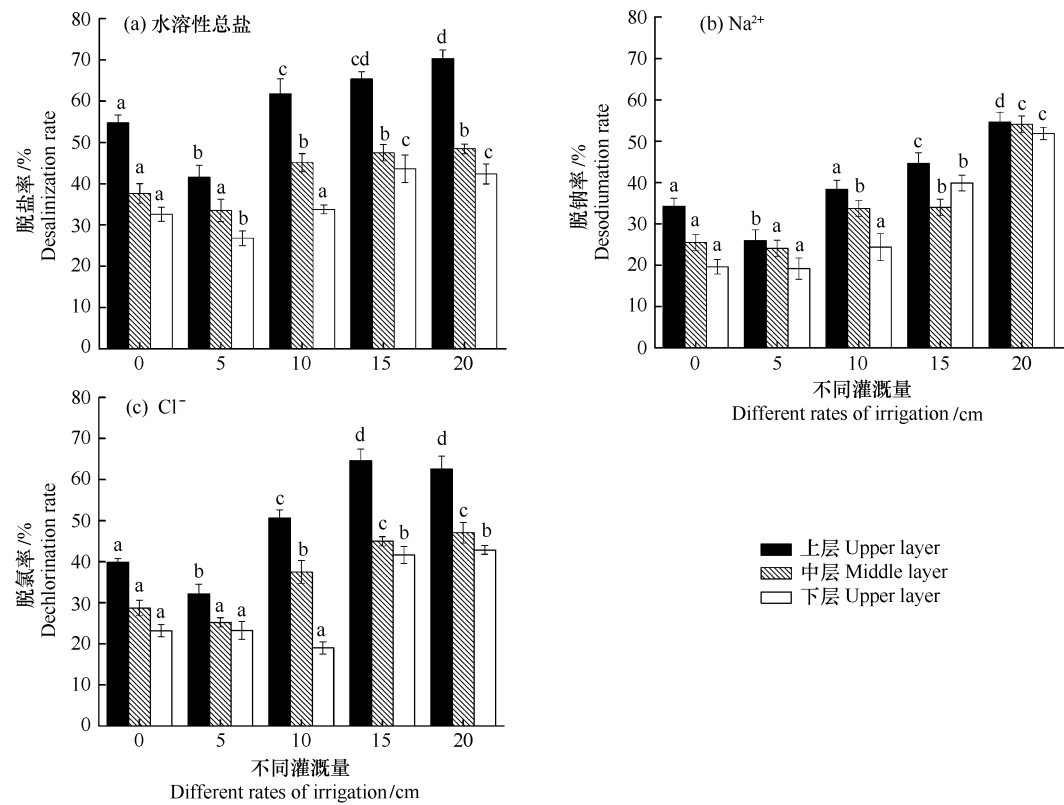


图5 不同废水灌溉量对不同深度土壤盐去除效果的影响(显著水平 $\alpha = 0.01$)

Fig.5 Influence of different irrigation rates on effect of the salt removal of different soil layers (significance level $\alpha = 0.01$)

的土壤上、中、下层可溶性盐依次减少的空间分布规律,张蕾娜^[20]等人的研究也表明土壤含盐量越高,脱盐率越大。

脱钠率、脱氯率总体变化规律和脱盐率一致,即各处理上层土壤脱钠率、脱氯率均比中下层土壤高,但各处理间具体差异显著性又不同(图5),同一土壤深度中不同字母表示差异显著。

2.3 造纸废水灌溉对土壤养分的影响

从表4中2007年5月数据可知土壤各养分本底情况:有机质(7.059—8.552g/kg)、碱解氮(9.207—13.41mg/kg)、速效磷(7.646—8.499mg/kg)、速效钾(252.9—291.2mg/kg)。结合表3中土壤养分含量分级标准得出:此试验区在灌溉造纸废水前土壤有机质处于第5级(缺乏)水平、碱解氮处于第6级(急缺)水平、速效磷处于第4级(较缺)水平、速效钾处于第1级(丰富)水平。可见,此试验区除土壤速效钾含量很丰富外,其余养分含量均低于正常土壤水平,这和该试验区土壤质地以及退化程度有关。

表3 土壤养分含量分级标准

Table 3 Classification standard of soil nutrients values

级别 Level	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable N	有效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
1. 丰富 Rich	>40	>150	>40	>200
2. 较丰富 Relatively rich	>30—40	>120—150	>20—40	>150—200
3. 中等 Medium	>20—30	>90—120	>10—20	>100—150
4. 较缺 Relatively scarce	>10—20	>60—90	>5—10	>50—100
5. 缺 Scarce	>6—10	>30—60	>3—5	>30—50
6. 极缺 Extremely scarce	≤6	≤30	≤3	≤30

注:引自《第二次全国土壤普查技术规程》

表 4 不同量造纸废水灌溉对土壤养分的影响及差异显著性分析

Table 4 Influence of irrigation with different rates of paper mill effluent on soil nutrients and significance analysis of the difference

指标 Index	不同灌溉量 ^① /cm	时间 Time				后三次平均相对本 底值增加率/% ^②	F 值 F value
		07.05	07.08	07.11	08.03		
有机质	0	8.552	9.724	16.52	14.19	57.57 a	72.08
Organic matter	5	7.873	9.273	16.87	14.30	71.25 b	
/(g/kg)	10	8.309	11.85	18.95	13.70	78.55 bc	
	15	7.162	8.546	17.38	14.59	88.55 cd	
	20	7.059	8.967	16.29	14.78	89.02 d	
碱解氮	0	13.11	14.66	27.86	22.67	65.72 a	94.37
Alkali-hydrolyzable N	5	11.27	13.62	27.94	24.65	95.82 b	
/(mg/kg)	10	13.48	17.42	42.01	38.21	141.5 cd	
	15	9.723	13.24	28.72	26.06	133.2 c	
	20	9.207	15.28	29.36	29.08	166.9 d	
速效磷	0	8.020	8.854	7.996	7.281	0.305 a	87.39
Available P	5	8.282	9.325	8.730	7.134	1.389 a	
/(mg/kg)	10	8.499	10.82	7.661	8.873	7.266 b	
	15	8.015	9.846	7.900	8.752	10.19 b	
	20	7.646	8.285	9.383	9.532	18.58 c	
速效钾	0	287.3	276.4	266.0	349.4	3.479 a	1.519
Available K	5	271.4	245.5	273.1	325.7	3.681 a	
/(mg/kg)	10	291.2	272.2	294.5	339.4	3.710 a	
	15	252.9	238.5	246.5	303.7	3.952 a	
	20	261.7	249.8	258.0	309.3	4.059 a	

① Different irrigation rates; ② The increasing rate of the average of last three value compared with background value

2.3.1 对有机质的影响

表 4 结果表明,对照组土壤有机质的变化情况反映了该地区土壤有机质的季节性变化规律:2007 年 5 月到 2008 年 3 月先升高后降低,在 2007 年 11 月份达到最大值。其余处理有机质随时间变化规律和对照一致,均在秋季达到最大值。土壤有机质含量的增加主要通过植物和微生物的吸附作用完成^[21],本试验样地为光板地,没有植物生长,所以主要通过微生物吸附。理论上,由于夏季土壤微生物数量较多,可以吸附更多有机物质,有机质含量应高于秋季,但本试验则表现出秋季高于夏季,这可能与该地区“夏季多雨、秋季少雨”的气候条件有关,部分有机质被雨水淋洗流失,造成夏季有机质含量反而较低。

和对照组有机质增加率(57.57%)相比,各处理均显著高于对照,表明灌溉造纸废水可以增加土壤有机质含量,这是因为以草浆为原料的造纸废水含有大量以植物纤维、木质素为主的有机物质,灌溉后被土壤吸附累积。在本试验范围内,随着造纸废水灌溉量的增加表现出显著性差异($F=72.08, P<0.001$),灌溉量越大,土壤有机质增加越多,除了相邻处理间没有达到显著差异外,其余两两处理间均差异显著。

2.3.2 对碱解氮的影响

土壤碱解氮的季节性变化规律和有机质一致:2007 年 5 月到 2008 年 3 月先升高后降低,在 2007 年 11 月份达到最大值。

各处理碱解氮增加率均显著高于对照,表明灌溉造纸废水可以增加碱解氮含量,土壤碱解氮一方面直接来源于含氮较丰富的造纸废水,另一方面来源于有机质的矿化和全氮的转化。土壤有机质的增加为微生物提供大量的碳源,促进了微生物的生长,增加了酶的活性,从而有助于有机质的矿化,增加各种速效养分的含量,同时脲酶活性的增加也促进更多全氮转化为碱解氮^[22]。在本试验范围内,碱解氮含量随造纸废水灌溉量的增加表现出显著性差异($F=87.39, P<0.001$),除了灌溉 15cm 比灌溉 10cm 碱解氮增加率低外,其余处理碱解氮增加率均随灌溉量的增加而增加,且两两间差异显著。碱解氮含量受造纸废水灌溉量、土壤微生物数量、

酶活性等多种因素影响,灌溉 15cm 比 10cm 碱解氮增加率低可能主要是因为灌溉 15cm 土壤微生物数量(1.2×10^4 个/g)比灌溉 10cm 土壤微生物数量(1.5×10^4 个/g)少,有机质矿化和全氮转化程度较低。虽然灌溉 20cm 土壤微生物数量(1.3×10^4 个/g)也比灌溉 10cm 少,但废水量增加幅度较大,综合作用之下,灌溉 20cm 土壤碱解氮含量比 10cm 多。

2.3.3 对速效磷的影响

对照组土壤速效磷含量动态变化表现出先增加后降低的季节性变化规律,在 2007 年 8 月份达到最大值,各灌水处理与对照组有类似的动态变化趋势,但不尽相同。2007 年 11 月和 08 年 3 月速效磷含量降低与这段时间有机质含量升高有关,土壤有机质产生的羟基、羰基和酚羟基等可与磷竞争吸附位点,从而减少磷的吸附^[23]。

除灌溉 5cm 外,其余处理土壤速效磷增加率均高于对照,表明灌溉造纸废水可以增加土壤速效磷含量,其增加原因与碱解氮相似,一方面来自造纸废水中的磷,另一方面来自有机质的矿化和全磷的转化。在本试验范围内,速效磷增加率随灌溉量增加表现出显著性差异($F = 87.39, P < 0.001$),且随灌溉量的增加而增大,且除灌溉 10cm 和灌溉 15cm 两处理间差异不显著外,其余各处理间均两两差异显著。

2.3.4 对速效钾的影响

土壤速效钾含量季节动态变化规律为先降低后升高,在 2008 年 3 月达到最大值。所有处理 2007 年 5 月、2007 年 8 月和 2007 年 11 月 3 次速效钾含量波动不大,2008 年 3 月突增,原因有待于进一步研究。

和对照相比,各灌溉处理速效钾含量增加率略有增加,但没有表现出显著性差异,表明灌溉造纸废水没有使土壤速效钾含量显著增加,这是因为该试验区土壤速效钾本底含量很高,而造纸废水中钾含量相对较低。

2.4 重度退化滨海盐碱湿地灌溉造纸废水后土壤化学性质和正常芦苇湿地土壤化学性质比较

在试验样地附近选取一块芦苇正常生长的湿地,测定该湿地土壤各项化学指标含量见表 5。

表 5 芦苇湿地土壤基本性质

Table 5 The soil property of the reed wetland

指标 Index	pH	水溶性总盐/% Total soluble salts	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzable N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
数值 Value	8.230	1.433	9.028	25.86	7.651	281.8

比较可知:灌溉后土壤 pH 值为 8.19—8.39,虽有些处理土壤 pH 值略高于该芦苇湿地,但也都在芦苇能正常生长的范围内^[15];灌溉 15cm 和 20cm 造纸废水后水溶性总盐含量分别为 1.412%、1.357%,均低于该芦苇湿地水溶性总盐含量;各灌溉处理有机质含量均高于该芦苇湿地有机质含量;灌溉 10、15cm 和 20cm 造纸废水后碱解氮含量高于该芦苇湿地碱解氮含量;灌溉 10、15cm 和 20cm 造纸废水后速效磷含量高于该芦苇湿地速效磷含量;各灌溉处理速效钾含量均高于该芦苇湿地速效钾含量。

3 结论

芦苇作为拒盐型植物,能够在一定程度的盐碱土壤上生长,重度退化滨海盐碱湿地经造纸废水灌溉后其土壤化学性质得到改良,为芦苇湿地恢复提供了保障。

(1)造纸废水灌溉后退化盐碱湿地 pH 值略有升高,不同灌溉量对退化盐碱化湿地 pH 值影响差异不显著,不会加重土壤碱化。

(2)本试验灌溉废水矿化度(2080mg/L)较低,灌溉后不会造成土壤盐分的累积,反而可以降低水溶性盐含量,脱盐率达到 38.69%—72.29%,且在本试验范围内,盐分去除率随灌溉量的增加而增大。

(3)灌溉后土壤养分含量提高,有机质、碱解氮和速效磷含量增加率显著高于对照,且总体上随灌溉量的增加而增大,分别比对照高 13.68%—31.45%、31.01%—101.2% 和 1.08%—18.28%;速效钾含量增加率相对对照没有显著提高。

致谢:感谢山东省黄河三角洲生态环境研究中心各位老师野外调查和实验过程中所提供的帮助。

References:

- [1] Xu J M. Studies on the ecological evaluation, proper protection and utilization of the wetland resource in Yellow River Delta. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2001, 22(2) :45-49.
- [2] Cui B S, Liu X T. Ecological character changes and sustainability management of wetlands in the Yellow River Delta. *Geographical Science*, 2001, 21(3) :250-256.
- [3] Chen W F, Zhou W Z, Shi Y X. Crisis of wetlands in the Yellow River Delta and its protection. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(4) :499-502.
- [4] Li G D, Zhu L S, Xu Y S, Wang Y J. Impacts of eco-environment of farmland irrigated by brewery wastewater. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3) :251-253.
- [5] Peng J G, Yang P L, Wang Y, Ren S M. Effects of irrigation with reclaimed water on available nutrients and salinize-alkalization. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6) :58-61.
- [6] Heidarpour M, Mostafazadeh-Fard B, Abedi Koupai J, Malekian R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1-2) :87-94.
- [7] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, Kuslu Y, Dursun A. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6) :716-724.
- [8] Jalali M, Merikhpour H, Kaledhonkar M J, Van Der Zee S E A T M. Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils. *Agricultural Water Management*, 2008, 25(2) :143-153.
- [9] Pollice A, Lopez A, Laera G, Rubino P, Lonigro A. Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. *Science of the Total Environment*, 2004, 324(1-3) :201-210.
- [10] Xie Z P, Yang Z S. Study on the irrigation with pulp and paper effluent. *Journal of Gansu Normal University*, 2001, 6(2) :42-45.
- [11] Munir J. Mohammad Rusan, Sami Hinnawi, Laith Rousan. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 2007, 215(1-3) :143-152.
- [12] Alvarez-Bernal D, Contreras-Ramos S M, Trujillo-Tapia N, Olalde-Portugal V, Dendooven L. Effects of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(3) :269-177.
- [13] Hou P Q, Ren J, Tao L, Chen X M, Fu X Y. Effects of the desert ecological forest irrigated by papermaking wastewater on soil nutrition element. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2008, 27(1) :42-45.
- [14] Cheng Z, Dong M M. Effects of irrigation with papermaking wastewater on the amount of soil organic matter. *Environmental Study and Monitoring*, 2006, 19(1) :29-30.
- [15] Wu Y H, Li F Z, Xu W L. The study on the influence of irrigation with the wastewater of straw pulping and papermaking to reed growth. *Shanghai Papermaking*, 2004, 35(2) :52-55.
- [16] K. Kannan, G. Oblisami. Influence of irrigation with pulp and paper mill effluent on soil chemical and microbiological properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1990(10) :197-201.
- [17] National Environmental Protection Agency. Water and exhausted water monitoring analysis method: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [18] Bao S D. Soil Agrochemical Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [19] Chen W, Chen B B, Shen Q R. Study on the changes of pH value and alkalization of heavily saline soil in seabeach during its desalting process. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4) :521-528.
- [20] Zhang L N, Feng Y J, Zhang H. Study on the influential factors on degree to water and salt movement of seashore saline soil. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2001, 32(1) : 55-58.
- [21] Walker C, Lin H S. Soil property changes after four decades of wastewater irrigation: a landscape perspective. *Catena*, 2008, 73(1) :63-74.
- [22] Anna Piotrowska, Giuseppina Iamarino, Maria Antonietta Rao, Liliana Gianfreda. Short-term effects of olive mill waste water (OMW) on chemical and biochemical properties of a semiarid Mediterranean soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(3) :600-610.
- [23] Fang K, Chen X M, Wo F, Wu H S, Wang J T. Seasonal variability of available phosphorus in farmland soil of the Taihu Lake region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5) :1092-1096.

参考文献:

- [1] 许健民. 黄河三角洲湿地生态评价与保护利用对策研究(上). *中国农业资源与规划*, 2001, 22(2) :45-49.

- [2] 崔宝山,刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策. 地理科学,2001,21(3):250-256.
- [3] 陈为峰,周维芝,史衍玺. 黄河三角洲湿地面临的问题及其保护. 农业环境科学学报,2003,22(4):499-502.
- [4] 李光德,朱鲁生,徐玉新,王玉军. 啤酒废水灌溉对农田生态环境的影响研究. 农业环境保护,2002,21(3):251-253.
- [5] 彭致功,杨培岭,王勇,任淑梅. 再生水灌溉对草坪土壤速效养分及盐碱化的效应. 水土保持学报,2006,20(6):58-61.
- [10] 谢宗平,杨自生. 关于制浆造纸污水灌溉的探讨. 甘肃高师学报,2001,6(2):42-45.
- [13] 侯倍强,任珺,陶玲,陈学民,伏小勇. 造纸废水灌溉对沙漠生态林土壤营养成分的影响. 兰州交通大学学报,2008,27(1):42-45.
- [14] 程钟,董毛毛. 造纸废水灌溉对湿地土壤中有机质含量的影响. 环境研究与监测,2006,19(1):29-30.
- [15] 吴玉辉,李凤翥,徐维骝. 稻草制浆造纸废水灌溉对芦苇生长影响研究. 上海造纸,2004,35(2):52-55.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法,第4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京:中国农业出版社,2005.
- [19] 陈巍,陈邦本,沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究. 土壤学报,2000,37(4):521-528.
- [20] 张雷娜,冯永军,张红. 滨海盐渍土盐运移影响因素研究. 山东农业大学学报(自然科学版),2001,32(1):55-58.
- [23] 方堃,陈效民,沃飞,吴华山,王荐婷. 太湖地区典型水稻土中速效磷变化规律研究. 土壤通报,2008,39(5):1092-1096.