

废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响

夏江宝¹, 刘庆¹, 谢文军¹, 孙景宽¹, 刘擎^{1,2}, 陆兆华^{1,2*}

(1. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州学院, 滨州 256603;

2. 中国矿业大学(北京)恢复生态研究所, 北京 100083)

摘要: 为研究造纸废水灌溉对黄河三角洲内陆盐碱芦苇地土壤水文特征的影响, 通过设置芦苇地不同废水灌溉次数下的随机区组试验, 采用田间测量土壤入渗过程和实验室内测定水文物理参数相结合的方法, 分析造纸废水灌溉前后土壤 pH 值、含盐率及土壤水文物理参数的变化。结果表明: 1) 废水灌溉后, 土壤 pH 均值降低 6.0%; 废水灌溉 1~2 次, 土壤含盐率降低 11.7%, 废水灌溉 3~4 次后, 增壤含盐率增加 12.6%。2) 废水灌溉后土壤体积质量均值减小 6.5%, 总孔隙度均值增大 18.1%; 随着废水灌溉次数的增多, 土壤体积质量和总孔隙度分别有减小和增大的趋势。3) Horton 模型比较适合描述废水灌溉后芦苇群落的土壤入渗过程, 废水灌溉降低了初渗率, 但随着废水灌溉次数的增多, 稳渗率增加明显。4) 废水灌溉增强了土壤贮蓄水分的能力, 废水灌溉 3 次吸持贮水量达到最高 (90.15 mm), 灌水 4 次滞留贮水量达到最高 (4.51 mm)。与未灌溉相比, 废水灌溉具有明显的压碱抑盐、改良土壤水文物理性状、提高土壤入渗和贮水能力的作用, 但不同灌溉次数处理间差异性显著。该研究为黄河三角洲内陆盐碱地区芦苇群落在造纸废水灌溉下的适宜灌溉次数和灌溉水量的确定提供了科学依据, 有利于造纸废水资源的合理化开发利用。

关键词: 造纸, 废水, 土壤, 芦苇, 水文物理性质, 黄河三角洲

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.011

中图分类号: S274.1, S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0063-06

夏江宝, 刘庆, 谢文军, 等. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 63-68.

Xia Jiangbao, Liu Qing, Xie Wenjun, et al. Effect of wastewater irrigation on soil hydrological properties in reed marsh[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 63-68. (in Chinese with English abstract)

0 引言

黄河三角洲内陆盐碱地区存在面积较大的芦苇群落, 但因蒸降比大的气候条件, 黄河断流、淡水资源缺乏的水文状况及人为因素等造成的干旱发生频率及程度越来越严重, 同时因为灌溉不当、植被破坏导致的次生盐碱化问题也较突出, 这些环境胁迫致使该区域大面积芦苇群落出现不同程度的退化, 利用造纸废水灌溉是修复该脆弱内陆盐碱生态区的主要措施之一。目前对用造纸废水灌溉下不同区域、不同植被类型的地下水特征、土壤微生物及营养元素等的影响状况进行了研究^[1-4], 对利用海水及其他咸水对滨海盐碱土的改良作用进行了研究并提出了相应的灌溉模式^[5-7], 利用造纸废水灌溉对盐碱化土壤的生态修复机理进行了分析探索, 但多是对其土壤化学性质改良及芦苇生长状况进行了测定分析^[4,8-9], 而对土壤水文物理特性的影响报道较少^[10-11]。土壤水文物理参数不仅能够反映造纸废水灌溉后对芦苇群落土壤的

基本物理性质改良效果, 更能较好反映土壤层贮蓄、调节水分的潜在能力及对芦苇地生态水文过程的影响, 对研究内陆缺水的盐碱芦苇地土壤生态系统的水分循环及自我修复、调节具有重要的指导意义。土壤体积质量和孔隙度直接影响到土壤的通气性和透水性^[10,12]。土壤水分入渗过程和渗透能力决定了降雨过程再分配中地表径流和土壤水分的贮存及壤中流与地下径流的产生和发展, 对流域产流机理和生态水文过程的调节机制具有十分重要的意义^[13-14]。土壤贮水量是评价植物群落下土壤水文调洪和涵养水源的重要指标, 多用来反映土壤贮蓄和调节水分的潜在能力^[12,15]。

不同造纸废水灌溉次数能够形成该试验区芦苇地干湿交替的生态环境, 这对改善土壤内氧气供应和氧化还原电位, 促进土壤内有机污染物降解, 同时对监测芦苇地土壤对造纸废水的环境容纳能力有较大意义^[8]。为此, 本研究在黄河三角洲内陆盐碱地以某造纸厂造纸废水灌溉干旱生境的芦苇群落为研究对象, 分析不同造纸废水灌溉次数对芦苇群落土壤水文物理特性的影响, 试图从理论和实践上为黄河三角洲内陆干旱地区的水土资源合理利用及造纸废水资源化利用提供理论依据和技术支持, 为“造纸废水—芦苇—造纸”生态纸业循环经济模式在研究区的进一步推广提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选择在沾化县城北 10 km 徒骇河东岸原生芦

收稿时间: 2009-05-11 修订时间: 2009-11-12

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A13); 山东省科技发展计划项目(2005GG4206003; 2008GG3NS07005); 滨州学院重大课题项目(2008ZDL03)

作者简介: 夏江宝(1978—), 男, 山东安丘人, 博士, 主要从事植被恢复与生态重建、水土保持学研究。滨州 滨州学院黄河三角洲生态环境研究中心, 256603。Email: xiajb@163.com

*通信作者: 陆兆华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事恢复生态学研究。滨州 滨州学院黄河三角洲生态环境研究中心, 256603。

Email: lu-zhh@263.net

苇地，零星分布碱蓬、罗布麻、獐毛等植物，盐碱程度较重区域已无植被覆盖。该区土壤属于滨海潮土，土体构型多有厚黏层，分布于徒骇河沿岸和秦口河中游东侧海拔 5 m 以上的地段，面积 2 196 万 hm^2 。该区域属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候，年平均气温 12.5℃ 左右，年平均降水量约 600 mm，年蒸发量 1 800~2 000 mm。该试验区地下水矿化度高，淡水资源缺乏，芦苇湿地退化严重，经常处于干旱缺水状态，造纸废水灌溉是维持芦苇群落正常生长的主要措施。由于过量开采地下水引起的徒骇河河口海水的倒灌，使沿河区域土壤盐碱化程度较高，土壤可溶性盐的质量分数在 0.4%~2.5%，pH 值在 7.9~8.9。

1.2 样地设置与样品采集

沾化县某造纸厂在该试验区建立了纸浆造纸废水生物塘—芦苇湿地复合处理系统，工艺流程为：原水→调节塘→厌氧塘→好氧塘→兼性塘→储存塘→芦苇地。本试验采用经生物塘处理后的造纸废水进行内陆缺水盐碱地原生芦苇地的灌溉处理，造纸废水水质概况如下：化学需氧量（COD）924 mg/L，pH 值 7.83~8.25， Na^+ 为 0.15%， Cl^- 为 0.16%，矿化度 3 984 mg/L，总氮（TN）25.31 $\mu\text{g/mL}$ ，总磷（TP）4.664 $\mu\text{g/mL}$ ，固体悬浮物（SS）726.31 mg/L。在生长较为一致的芦苇群落采用随机区组进行试验小区布设，设置造纸废水灌溉 1 次（I1）、灌溉 2 次（I2）、灌溉 3 次（I3）、灌溉 4 次（I4）共 4 种废水处理方式，同时以不灌溉（CK）作为对照，共设计 15 个试验小区，每小区面积为 2 m×2 m，为避免灌溉后造纸废水的侧渗影响，小区采用四周防渗膜建垄法处理，单次灌水深度为 5 cm，每 15 d 灌水 1 次，从 6 月中旬进行灌溉试验，10 月底收割芦苇后进行土壤样品采集及土壤水文物理参数的测定，为避免边缘效应，土壤样品采集及水文物理参数的测定尽量在每小区中部，按照 S 形样式进行取样测定分析。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化参数测定

pH 值采用 pH 计（水土比 5：1），可溶性盐采用质量法测定（水土比 5：1），烘干法测定土壤含水率，环刀浸水法测定土壤体积质量和孔隙度等各项水文物理参数^[16]。并由公式计算一定土层深度内的土壤最大吸持贮水量、最大滞留贮水量和饱和贮水量。即

$$W_c = 1000 \cdot P_c \cdot h$$

$$W_{nc} = 1000 \cdot P_{nc} \cdot h$$

$$W_t = 1000 \cdot P_t \cdot h$$

式中： W_c 、 W_{nc} 和 W_t ——分别为土壤水分最大吸持贮水量、土壤水分最大滞留贮存量和土壤水分饱和贮水量，mm； P_c 、 P_{nc} 和 P_t ——分别为毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度，%； h ——计算土层深度，m，本研究为 0.2 m。

1.3.2 土壤入渗特征测定

利用渗透筒法（单环定水头逐次加水）测定不同时间段的土壤入渗率和制作入渗过程曲线。利用 SPSS 统计软件，分别应用 Kostiakov 入渗模型、Horton 入渗模型和通

用（一般）入渗模型拟合废水灌溉后的土壤入渗过程，求解初渗率、稳渗率等入渗特征参数。

2 结果与分析

2.1 造纸废水灌溉对土壤盐碱化的影响

由表 1 可知，随着造纸废水灌溉次数的增多土壤 pH 值有下降趋势，灌溉 3~4 次后，土壤 pH 值下降最明显，与未灌溉的对照相比，pH 值下降 6.7%、7.9%。随着灌溉次数的增加，土壤含盐率表现为先降低后增加的趋势，灌水 1~2 次，土壤含盐率比 CK 分别降低 7.0%、16.4%，灌溉 3~4 次分别比 CK 增加 13.9%、14.9%，表现出一定的积盐负效应。

表 1 造纸废水灌溉下的土壤盐碱含率
Table 1 Soil saline-alkali content by irrigation with papermaking wastewater

处理	pH 值	含盐率/%
CK	8.85±0.16	2.01±0.55
I1	8.45±0.15	1.87±0.28
I2	8.43±0.19	1.68±0.44
I3	8.26±0.28	2.29±0.24
I4	8.15±0.18	2.31±0.65

2.2 造纸废水灌溉对土壤体积质量和孔隙度的影响

不同灌溉次数下的土壤体积质量表现出显著性差异（ $F_{5,12}=124.121$ ， $p<0.001$ ），由图 1 可知，与对照相比，废水灌溉下土壤体积质量均显著减小，灌溉 3~4 次土壤体积质量最小，分别比 CK 下降 8.6%、8.9%，但灌溉 1~2 次的土壤体积质量差异不显著。不同灌溉次数下的土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均表现出显著性差异（ $p<0.001$ ），但灌溉 1~2 次的土壤总孔隙度、毛管孔隙度差异不显著，而非毛管孔隙度差异显著。与对照相比，废水灌溉下总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均表现出增大趋势，且灌溉 1~4 次后的土壤总孔隙度分别比 CK 增加 14.1%、15.4%、25.9%、32.8%，表明废水灌溉在一定程度上改善了土壤通气状况和透水性能。

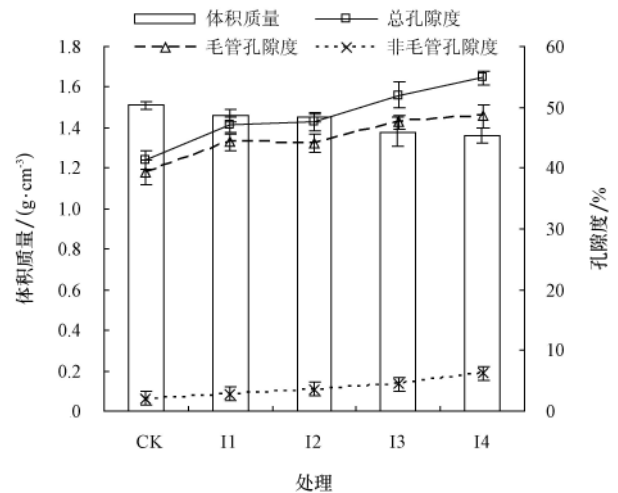


图 1 造纸废水灌溉下土壤体积质量和孔隙度
Fig.1 Soil density and porosity by irrigation with papermaking wastewater

2.3 造纸废水灌溉对土壤入渗性能的影响

不同灌溉次数下土壤入渗参数差异性显著 ($F_{5,12}=1\ 088.817$, $p<0.001$), 由图 2 和表 2 可知, 随着灌溉次数的增加, 初渗率有减弱趋势, 灌溉 1~4 次的初渗率分别比 CK 下降 11.3%、17.3%、30.8%、32.4%, 表明废水灌溉在一定程度上减弱了对降水的初始入渗性能。稳渗率随着灌溉次数的增加表现出增大趋势, 灌溉 1~4 次分别比 CK 增加 7.0%、12.7%、54.1%、95.9%。

合适的入渗模型是研究植被调蓄水分功能的重要手段之一^[14], 本文采用 3 种常用的入渗模型对试验资料进行拟合分析 (图 2)。分别是: 1) 考斯加科夫 (Kostiakov) 公式: $f=at^n$; f, t 分别为入渗率、入渗时间; a, n 为经验参数。2) 霍顿 (Horton) 公式: $f=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$; f, f_0, f_c 和 t 分别为入渗率、初渗率、稳渗率和入渗时间, k 为经验参数, 决定着 f 从 f_0 减小到 f_c 的速度。3) 通用经验公式: $f=at^n+b$; f, t 分别为入渗率、入渗时间, a, b, n 均为经验参数 (b 相当于稳渗率)。3 种模型对不同灌溉次数下土壤入渗过程均能取得较好的拟合效果, 能够反映渗透曲线的变化特征, 其渗透曲线变化趋势一致可分为 3 个阶段, 即渗透初期的渗透率瞬变阶段、其次为渐变阶段, 随着时间的推移而下降, 最后达到平稳阶段。采用 Kostiakov 模型拟合时, a 值在 24.39~89.72 之间, 远高于实测初始入渗速率值; n 值在 0.51~0.90 之间, 其大小反映了入渗率递减的状况, n 值越大, 入渗率随时间递减越快, 可见废水灌溉 1~2 次其入渗率随时间递减程

度高于 CK, 但灌水 3~4 次后入渗率随时间变化缓慢。采用 Horton 模型时, f_c 值在 1.48~2.97 mm/min, 与实测值比较接近, k 值在 0.05~0.08 之间, 与 CK 相比 k 值偏大, 表明废水灌溉后从初始入渗率减小到稳渗率的时间缩短, 即渗透性能有增强趋势。而通用模型 b 值在 0.33~2.38 mm/min, 远小于对应实测稳渗率, 结合相关系数、实测初始入渗率、稳渗率值综合分析, 可以看出 Horton 模型拟合精度较高, 其拟合结果比 Kostiakov 模型和通用模型更接近于实测值, 表明 Horton 模型比较适用于描述该试验区芦苇群落的土壤入渗特征。

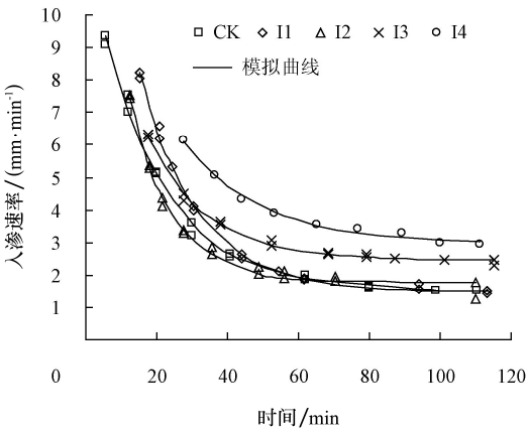


图 2 造纸废水灌溉下土壤入渗速率曲线
Fig.2 Infiltration curves by irrigation with papermaking wastewater

表 2 造纸废水灌溉下土壤入渗过程的模型拟合
Table 2 Models fitting of soil infiltration by irrigation with papermaking wastewater

处理	入渗实测参数/ (mm·min ⁻¹)		Kostiakov 模型 $f=at^n$ 参数			Horton 模型 $f=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$ 参数				通用模型 $f=at^n+b$ 参数			
	f_0	f_c	a	n	R^2	f_0	f_c	k	R^2	a	b	n	R^2
CK	9.10	1.57	33.44	0.67	0.976	12.18	1.48	0.05	0.999	23.55	0.33	3.81	0.977
I1	8.07	1.68	89.72	0.90	0.957	18.60	1.50	0.06	0.995	198.52	0.77	1.20	0.975
I2	7.53	1.77	48.23	0.78	0.983	17.11	1.76	0.08	0.995	125.95	0.92	0.17	0.994
I3	6.30	2.42	24.39	0.51	0.968	13.06	2.45	0.06	0.991	158.07	1.95	1.26	0.998
I4	6.15	3.07	31.48	0.51	0.972	14.25	2.97	0.07	0.997	304.74	2.38	1.32	0.995

2.4 造纸废水灌溉对土壤贮水性能的影响

数据分析表明, 不同灌溉次数下的饱和贮水量 ($F_{5,12}=201.578$, $p<0.001$)、吸持贮水量 ($F_{5,12}=107.171$, $p<0.001$)、滞留贮水量 ($F_{5,12}=947.926$, $p<0.001$) 均表现显著性差异。由图 3 可知, 与对照相比, 芦苇地饱和贮水量增加明显, 随着灌溉次数的增多饱和贮水量增加显著, 但灌溉 1~2 次、3~4 次差异均不显著, 灌溉 1~2 次、3~4 次分别比 CK 增加 1.46%~1.50%、3.54%~4.52%。废水灌溉后土壤吸持贮水量增加明显, 变化趋势和饱和贮水量相同, 废水灌溉 3 次吸持贮水量达到最高, 比 CK 增加 4.29%, 但灌溉 4 次反而下降, 仅比 CK 增加 1.25%。随着灌溉次数的增加, 滞留贮水量先减少后增加。

土壤蓄水性能与土壤前期含水率密切相关, 当土壤

湿度大时, 土壤蓄水量减少, 即使降雨量很小, 也会产生地表径流, 本次测定时试验区内土壤质量含水率差异不显著, 均值为(28.23±1.49)%。把饱和贮水量与土壤前期含水量之差作为衡量土壤涵蓄降水量的指标^[17], 不同灌溉次数下的涵蓄降水量差异显著 ($F_{5,12}=535.296$, $p<0.001$), 但灌溉 1~2 次涵蓄降水量差异不显著。由图 3 可知, 随着灌溉次数的增加, 涵蓄降水量先减少后增加, 4 次灌溉后涵蓄降水量达到最高, 比 CK 增加 125.24%。毛管蓄水量与土壤前期含水量之差反映供植物利用的潜在土壤有效蓄水, 称其为有效涵蓄量^[17], 不同灌溉次数下的有效涵蓄量差异显著 ($F_{5,12}=668.025$, $p<0.001$), 随着灌溉次数的增加, 有效涵蓄量表现为增加趋势, 3~4 次灌溉后有效涵蓄量达到最高, 分别比 CK 增加 36.28%、105.97%。

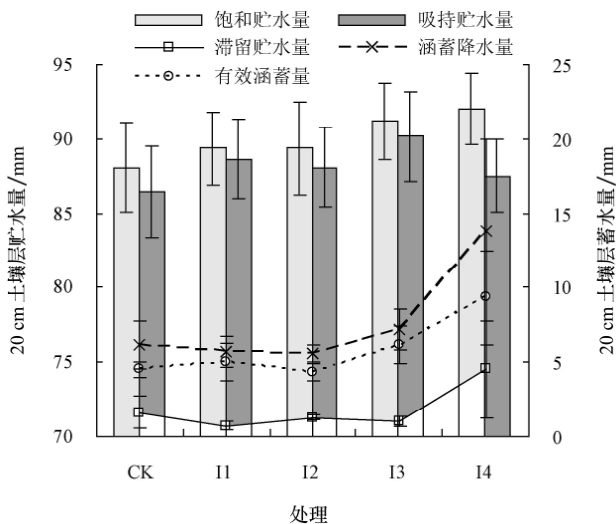


图3 造纸废水灌溉下土壤蓄水量

Fig.3 Soil water-holding capacity by irrigation with papermaking wastewater

3 讨论

土壤 pH 值和含盐量是内陆缺水盐碱地造纸废水灌溉后土壤改良的重要参数之一,已有研究表明:草浆废水灌溉后,海涂湿地芦苇地 pH 值上升,而盐分含量明显下降^[9];荒漠地区固沙生态林造纸废水灌溉后, pH 值下降,含盐量随灌溉年限的增加而增加^[11];利用海水灌溉 3 a 耐盐作物后,含盐量明显升高^[5]。差异原因主要与灌水浓度、灌水方式及原地区土壤盐碱背景值有较大关系,该试验区原始土壤 pH 值在 8.85 左右,灌溉造纸废水 pH 值在 7.83~8.25 之间,灌溉废水的 pH 值小于当地土壤环境的本底值,因此对土壤碱度有一定的稀释作用,起到了压碱效果。含盐量随着灌溉次数的增多,表现为先降低后增加,与对照相比,废水灌溉 1~2 次含盐量均值降低 11.69%、灌溉 3~4 次均值增加 14.43%,可见造纸废水灌溉对该内陆缺水盐碱地的土壤盐分淋洗具有一定的限制作用,少量废水灌溉淋洗作用和植物对无机盐的吸收与吸附作用能减少土壤中的含盐量,但灌溉次数增多后,表现出一定的积盐效应,且该试验区蒸降比大,有限的降雨不能充分淋洗土壤剖面中存在的盐分,同时也表明芦苇群落对钠离子的需求也是有限的^[2,5,11]。

研究表明,一般土壤体积质量值为 $1.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$,结构良好的土壤为 $1.25 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ ^[12],而灌溉 1~2 次造纸废水后土壤体积质量在 $1.45 \sim 1.46 \text{ g/cm}^3$ 之间明显偏高,而灌溉 3~4 次后土壤体积质量为 $1.36 \sim 1.38 \text{ g/cm}^3$,表明对土壤结构和性能的改良作用较好。结构良好,水气关系协调的土壤,总孔隙度为 40%~50%,非毛管孔隙度在 10% 以上,非毛管孔隙度与毛管孔隙度比例在 0.25~0.50^[12],造纸废水灌溉后,土壤总孔隙度 (47%~55%) 并不低,但非毛管与毛管孔隙度比例仅在 0.06~0.13,对照为 0.05,可见该芦苇盐碱地非毛管孔隙数量明显偏低,土壤通气透水性能受到一定的限制,而造纸废水灌溉次数的增多有利于改善非毛管孔隙的数量。与对照相比,

该试验区进行废水灌溉后,土壤体积质量减小,孔隙度增大,这与对沙漠人工林造纸废水灌溉后土壤体积质量和孔隙度的变化规律一致^[10-11],但与草浆废水灌溉桶栽芦苇后,土壤体积质量增加、孔隙度减小正相反^[9],表明土壤体积质量和孔隙度的变化与造纸废水灌溉的质量浓度、灌溉年限均有一定的关系。

土壤入渗观测可探讨废水灌溉后芦苇群落理水调洪及其涵养水源功能^[12-14]。该研究表明,废水灌溉延长了初渗率的时间、减弱了对降水的初始入渗性能,在野外试验时,注意到废水灌溉后在土壤表层有一层致密的黑褐色土壤结皮,这可能是由于造纸废水中含有的胶黏木素物质及沉淀在表层的纤维素、半纤维素和悬浮物聚集粘结而形成的^[10-11]。有研究证明,土壤结皮的存在能够减小土壤入渗性能^[14],这应是随着废水灌溉次数的增多,土壤初始入渗性能持续下降的原因。但水分通过土壤结皮后,由于废水灌溉后土壤体积质量和孔隙度得到较大改善,随着灌溉次数的增多,稳渗率增加明显,特别是废水灌溉 3~4 次后,芦苇地稳渗率提高 54.1%~95.9%,在一定程度上能够保证较多的降水渗入土壤中储存。Kostiakov 模型、Horton 模型及通用经验公式 3 种模型均能较好地反映废水灌溉下的土壤入渗过程, Horton 模型拟合精度较高,其拟合结果比 Kostiakov 模型和通用模型更接近于实测值。

吸持贮存水主要反映植物吸持水分供其正常生理活动所需的有效水分^[12,17],废水灌溉后吸持贮水量表现为先增加,灌溉 3 次后达到最高 (90.15 mm),利于芦苇根系对水分的吸收,对其正常生理生态过程较为有利;但灌溉 4 次后表现为减小趋势 (87.52 mm),可见灌溉次数的持续增加不利于贮存对植物有效利用的水分。滞留贮存水主要反映植被涵养水源功能的强弱^[12,17],废水灌溉 1~3 次后,滞留贮水量分别比对照降低 56.17%、19.75%、36.42%,而灌溉 4 次后,比对照增加 64.08%,可见长时间灌溉后,由于非毛管孔隙度增加显著,能有效减少地表径流和增强土壤的涵养水源功能。结合涵养降水量和有效涵养量的综合分析,可知废水灌溉对土壤的改良不但在降雨吸收,减少地表径流等方面有较好的潜在功能,且能够贮存供植物生长提供所必需的水分条件。

4 结论

1) 随着造纸废水灌溉次数的增多,土壤 pH 值有所下降,对土壤碱度有一定的稀释作用,含盐量表现为先降低后增加。与未灌溉相比,废水灌溉后改善了土壤的物理性质,使土壤基质变的比较疏松,利于植物根系及土壤的水分、孔气、热量的传递,表现为土壤体积质量减小,孔隙度增大。

2) 由于土壤结皮的存在,造纸废水灌溉降低了初渗率,但随着灌溉次数的增多,稳渗率增加明显; Horton 模型比较适合描述废水灌溉后芦苇群落的土壤入渗过程,废水灌溉 1~2 次后其入渗率随时间递减程度高于废水灌溉 3~4 次,并且废水灌溉后从初渗率减小到稳渗率的时间缩短。造纸废水灌溉增强了芦苇群落贮蓄土壤水

分的能力, 但废水灌溉 3 次贮存水分对植物生理生长最为有利, 而灌水 4 次对土壤层涵养水源功能较为有效。

3) 从改良土壤水文物理特性及贮蓄水分的角度考虑, 建议在进行造纸废水灌溉该黄河三角洲内陆缺水盐碱地芦苇群落时, 以灌水 3 次较好, 其次是 4 次, 灌水 1~2 次对土壤盐碱程度及水文物理性状的改良效果不明显。本文仅对 4 种不同造纸废水灌溉次数下的土壤水文物理性状进行了测定分析, 要真正探明造纸废水资源化利用效果及其改良土壤的综合效应, 在今后的研究中还需加强对长时间序列及系列灌溉梯度下的土壤理化性质及芦苇生长状况的测定分析。

[参 考 文 献]

- [1] Khan S, Asghar M N, Rana T. Tariq characterizing groundwater dynamics based on impact of pulp and paper mill effluent irrigation and climate variability[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 185(1/2/3/4): 131—148.
- [2] Singh S K. Effect of irrigation with paper mill effluent on the nutrient status of soil[J]. *International Journal of Soil Science*, 2007, 2(1): 74—77.
- [3] Saxena M, Kumar A, Rai J P N. Microbial dynamics of pulp and paper mill effluent affected soil[J]. *Indian Journal of Ecological*, 2002, 29(2), 227—232.
- [4] Patterson S J, Chanasyk D S, Mapfumo E, et al. Effects of diluted kraft pulp mill effluent on hybrid poplar and soil chemical properties[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(6): 547—560.
- [5] 陈效民, 白冰, 黄德安. 黄河三角洲海水灌溉对土壤盐碱化和导水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 50—54.
Chen Xiaomin, Bai Bing, Huang Dean. Effects of seawater irrigation on soil salinize-alkalization and saturation conductivity in Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(2): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [6] Miyamoto S, Arturo C. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1/2): 28—38.
- [7] Alan J, Lymbery G, Doupe B T, et al. Efficacy of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(1): 1—7.
- [8] 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 等. 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2): 281—286.
Li Jialiang, Lu Zhaohua, Tian Jiayi, et al. Bio-remediation of coastal saline-alkali marshy soil by irrigation with pulp and paper waste water[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(2): 281—286. (in Chinese with English abstract)
- [9] 丁成, 王世和, 杨春生. 草浆废水灌溉对海涂湿地土壤及芦苇生长的影响[J]. *生态环境*, 2005, 14(1): 21—25.
Ding Cheng, Wang Shihe, Yang Chunsheng. Influence on the soils of seashore wetland and the growth of pulp wastewater irrigated reeds[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [10] 伏小勇, 任珺, 陈学民, 等. 造纸废水灌溉对沙漠人工林土壤物理特性的影响[J]. *中国造纸*, 2008, 27(10): 38—41.
Fu Xiaoyong, Ren Jun, Chen Xuemin, et al. Effects of irrigation with papermaking wastewater on the physical property of the desert plantation soil[J]. *China Pulp and Paper*, 2008, 27(10): 38—41. (in Chinese with English abstract)
- [11] 伏小勇, 牛磊, 白炜, 等. 造纸废水资源化利用对土壤理化性质的影响[J]. *兰州交通大学学报: 自然科学版*, 2007, 26(4): 93—96.
Fu Xiaoyong, Niu Lei, Bai Wei, et al. Influence of pulp and paper wastewater utilization on soil physicochemical properties[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences*, 2007, 26(4): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭静, 姚孝友, 刘霞, 等. 不同生态修复措施下鲁中山区土壤的水文特征[J]. *浙江林学院学报*, 2008, 25(3): 342—349.
Guo Jing, Yao Xiaoyou, Liu Xia, et al. Soil hydrology with four of ecological restoration measures in a mountainous area of central Shandong Province[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(3): 342—349. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王伟, 张洪江, 李猛, 等. 重庆市四面山林地土壤水分入渗特性研究与评价[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(4): 95—99.
Wang Wei, Zhang Hongjiang, Li Meng, et al. Research and evaluation on infiltration characteristic of forest soil in Simian Mountain of Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 95—99. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐敬华, 王国梁, 陈云明, 等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 19—25.
Xu Jinghua, Wang Guoliang, Chen Yunming, et al. Infiltration characteristics of soil and its influencing factors in abandoned farmland in the Hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 19—25. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 31—35.
Wang Guoliang, Liu Guobin, Dang Xiaohu. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and gully region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [16] 骆洪义, 丁方军. 土壤学实验[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995: 63—68, 97—154.
- [17] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 173—176.
Xu Jingwei, Li Chuanrong, Xia Jiangbao, et al. Soil

hydrological properties of different forest types in lowlands of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water*

Conservation, 2009, 23(1): 173 — 176. (in Chinese with English abstract)

Effect of wastewater irrigation on soil hydrological properties in reed marsh

Xia Jiangbao¹, Liu Qing¹, Xie Wenjun¹, Sun Jingkuan¹, Liu Qing^{1,2}, Lu Zhaohua^{1,2*}

(1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603 China*; 2. *Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing 100083 China*)

Abstract: To study the effect of papermaking wastewater irrigation on soil hydrological properties in saline reed field, different wastewater irrigation frequencies were employed in the saline reed field of Yellow River Delta. Soil infiltration course and hydrological properties were determined in field and laboratory. After wastewater irrigation, the change of the soil pH value, soil salt content and soil hydrologic-physical properties were observed. The results were showed that: 1) After wastewater irrigation, the mean reduction of soil pH value was 6.0%. In 1 irrigation time and 2 irrigation times treatments, soil salt content decreased by 11.7%, and soil salt content increased by 12.6% in 3-4 irrigation times treatments. 2) After irrigation, the mean reduction of soil bulk density was 6.5%, and the mean increment of soil total porosity was 18.1%. With the irrigation frequency increasing, soil density was decreased and soil total porosity was increased. 3) Soil infiltration course of reed field irrigated by wastewater fitted Horton infiltration model well. After wastewater irrigation, the first infiltration rate decreased, but the stable infiltration rate promoted with the wastewater irrigation frequency increasing. 4) Soil water-holding capacity was increased by wastewater irrigation. The maximum water-holding capacity in capillary was 90.15 mm in the treatment of irrigation 3 irrigations, and the maximum water-holding capacity in non-capillary was 4.15 mm in treatment of 4 irrigations. The papermaking wastewater irrigation had obvious benefits to reduce soil salinity, improve soil hydrologic-physical properties and enhance soil infiltration and water-holding capacity. However, there was the significant different in soil properties between treatments. These results provide the scientific basis for determining suitable irrigation frequency and the irrigation volume of papermaking wastewater in saline reed field of Yellow River Delta, which is of great significance to the exploitation and utilization of papermaking wastewater resources.

Key words: papermaking, wastewater, soils, reeds, hydrologic-physical properties, Yellow River Delta