

再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响

夏江宝¹, 谢文军¹, 陆兆华^{1,2,*}, 贾琼^{1,2}, 董立杰^{1,2}

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

2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院 恢复生态研究所, 北京 100083)

摘要:为提高再生水资源在芦苇群落生态恢复中的高效利用,采用温室模拟实验的方法,以未灌溉(CK)为对照,对再生水(FS)、再生水清水轮灌(QF)及清水灌溉(QS)等3种浇灌方式下的芦苇地盐碱含量及水文物理参数进行测定分析,以阐明不同浇灌方式下芦苇地的土壤水文生态效应。结果表明:清水灌溉、清废轮灌降盐压碱效果显著($P < 0.001$),而再生水灌溉后土壤含盐量增加12.8%。与未灌溉相比,3种浇灌方式均使土壤容重减小,孔隙度增大,改善土壤水文物理效果表现为清废轮灌 > 清水灌溉 > 再生水灌溉。Horton模型比较适合描述灌溉后芦苇地土壤水分入渗过程,清水灌溉、清废轮灌改善了土壤水分的渗透性能,初渗率和稳渗率均比未灌溉增加,而再生水灌溉后初渗率下降15.0%。3种浇灌方式均能增强芦苇地贮蓄和保持土壤水分的能力,清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉的饱和蓄水量分别比未灌溉增加11.5%、4.3%、2.4%,涵蓄降水和供植物生长有效水分贮存能力表现为清废轮灌最好,其次为清水灌溉,而再生水灌溉则较差。

关键词:再生水; 芦苇; 水文物理性质; 土壤入渗; 土壤蓄水性能

Effects of different irrigation modes with reclaimed water on soil eco-hydrological characteristics of reed land

XIA Jiangbao¹, XIE Wenjun¹, LU Zhaohua^{1,2,*}, JIA Qiong^{1,2}, DONG Lijie^{1,2}

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

2 Institute of Restoration Ecology, College of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: To improve the ecological restoration efficient of reed (*Phragmites australis*) community by reclaimed water irrigation and observe the effect of reclaimed water irrigation on soil hydrological properties in saline reed field of Yellow River Delta, a simulation experiment was conducted in greenhouse of Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta. Four treatments were arranged: no irrigation (CK), alternative irrigation of fresh water and reclaimed water (QF), freshwater irrigation (QS), reclaimed water irrigation (FS). Soil infiltration course and hydrological properties were determined in greenhouse and laboratory. The change of the soil pH value, soil salt content and soil hydrologic-physical properties were also measured after reclaimed water irrigation.

Compared to the soil pH value (8.95) of the CK treatment, the reduction of soil pH value in the QS, QF and FS treatments was 4.9%, 4.4%, 1.3%, respectively. Soil salt contents decreased significantly in the treatments of QS and QF ($P < 0.001$), while increased by 12.8% after irrigation with FS. Compared to the CK treatment, the reduction of soil bulk density in the QF, QS and FS treatments was 15.9%, and 11.9%, 5.3%, respectively. The increment of soil total porosity in the QF, QS and FS treatments was 18.8%, 11.1%, and 9.1%, respectively. The soil density decreased, and soil total porosity increased in the three irrigation treatments (QF, QS and FS), and the treatments in order of greatest changes to least was QF > QS > FS > CK. Horton infiltration model was fitted better to reflect the soil infiltration course of reed soil after irrigation. In the treatments of QS and QF, soil infiltration capability, the first infiltration rate and the stable

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A13);国家自然科学基金资助项目(30770412);山东省科技攻关资助项目(2008GG10006024、2008GG3NS07005);滨州学院重大课题资助项目(2008ZDL03)

收稿日期:2010-01-04; 修订日期:2010-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lu-zhh@263.net

infiltration rate were all increased significantly after irrigation. Compared to the CK treatment, the increment of the first infiltration rate in the QF and QS treatments was 106.3%, 50.8%, and the increment of the stable infiltration rate in the QF, QS and FS treatments was 87.0%, 7.4%, and 3.7%, respectively. However the first infiltration rate decreased by 15.0%, due to the formation of soil crust after reclaimed water irrigation. Soil water-holding capacity was increased in three irrigation treatments, and the greatest water-holding capacity in capillary and non-capillary was in the treatment of alternative irrigation of fresh water and reclaimed water, which were $897.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $85.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared to the CK treatment, the increment of the total water-storage capacity in the QF, QS and FS treatments were 11.5%, 4.3% and 2.4%, respectively. The largest capacity of soil total absorption precipitation and effective water storage for plant growth was alternative irrigation of fresh water and reclaimed water, followed by freshwater irrigation, and the lowest was reclaimed water irrigation.

Accordingly, we concluded that: The reclaimed water 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 mode of reclaimed water in saline reed field of Yellow River Delta, which is of great significance to the exploitation and utilization of reclaimed water resources.

Key Words: reclaimed water; reed (*Phragmites australis*); hydro-physical properties; soil infiltration; soil water-storage capacity

再生水回用于农林业灌溉已成为世界上许多国家缓解水资源紧缺的成功举措之一,利用草浆造纸再生水在盐碱荒地上种植芦苇以恢复当地的生态环境被证明是可行的^[1-4],但其灌溉次数、灌溉浓度、浇灌方式等系列问题的不明确在一定程度上限制了再生水在植被恢复方面的资源化利用。目前对造纸再生水灌溉下不同区域、不同植被类型的地下水特征、土壤微生物及营养元素等性状进行研究^[5-8],对利用海水及其他咸水对滨海盐碱土的改良作用进行研究并提出了相应的灌溉模式^[9-11],同时造纸再生水灌溉对盐碱化土壤的生态修复机理也进行了分析探索,但多是对其土壤化学性质改良及芦苇生长状况进行测定分析^[4, 8, 12],而对造纸再生水灌溉后土壤水文生态特性的影响报道较少^[13-14]。为此,本研究以某造纸厂再生水灌溉模拟生境的芦苇为研究对象,测定分析再生水、清废轮灌及清水灌溉下芦苇地土壤盐碱含量及水文物理参数,旨在揭示不同再生水浇灌方式对芦苇群落土壤水文生态特性的改良效果,阐明对芦苇群落土壤层贮蓄、调节水分的潜在能力,确定出对芦苇群落土壤水文生态效应改善较好的再生水浇灌方式,为黄河三角洲盐碱荒地芦苇群落的生态恢复及再生水资源化利用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验土壤及灌溉水质

试验选用沾化县城北 10 km 徒骇河东岸芦苇地原状土,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,土壤可溶性盐的质量分数在 0.4%—2.5%, pH 值在 7.9—8.9。沾化县某造纸厂在该试验示范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,经造纸厂内初步处理后的再生水,输送至稳定塘,再经厌氧塘和兼性塘处理后用于盐碱荒地的芦苇灌溉。再生水灌溉水质概况为: COD_{Cr} $924 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.83—8.25, Na^+ 为 0.15%, Cl^- 为 0.16%, 矿化度 $3984 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN $25.31 \text{ ug} \cdot \text{mL}^{-1}$, TP $4.664 \text{ ug} \cdot \text{mL}^{-1}$, SS $726.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。淡水水质概况为: COD_{Cr} $14.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.51—7.70, Cl^- 为 0.02%, 总硬度 $435 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验材料及设计

在山东省黄河三角洲生态环境重点实验室建立的科研温室内,采用长×宽×高为 $0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$

的硬质塑料容器进行模拟试验,每容器装土高度 0.45 m,容器底面均匀设置直径 5 mm 的渗水小孔 18 个,下部用木条衬垫设置空隙层,底部放置长×宽×高为 1.0 m×0.8 m×0.08 m 的接水槽。选用生长较为一致的 3a 生芦苇实生苗主根系,平均直径 20 mm,每容器栽植 32 株。采用随机区组进行试验小区布设,设置再生水灌溉(FS);再生水、清水间隔灌溉(清废轮灌,QF),即灌溉 1 次再生水后,下次用清水灌溉,依次间隔进行;清水灌溉(QS)3 种浇灌方式,同时以未灌溉(CK)的土壤水文物理参数作为对照,每处理 3 次重复,共设计 12 个试验小区。灌水定额相同,每容器灌水为 4 L/次,灌溉期间要做到间歇晒田,但土壤不能出现干裂,约每 7—8 d 灌水 1 次,3 月中旬进行幼苗栽植,正常生长后,从 4 月份进行灌溉试验,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。

1.3 测定项目和方法

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容器中部,按照 S 形样式进行取样测定分析。pH 值采用 pH 计(水土比 5:1),可溶性盐采用重量法测定(水土比 5:1),烘干法测定土壤含水量,环刀浸水法测定土壤容重和孔隙度等各项水文物理参数^[15]。利用双环法测定不同时段土壤入渗率和制作入渗过程曲线,应用 Horton 入渗模型和通用(一般)入渗模型拟合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。并由公式计算一定土层深度内的土壤毛管蓄水量、非毛管蓄水量和饱和蓄水量。即:

$$W_c = 10000 \cdot P_c \cdot h; W_{nc} = 10000 \cdot P_{nc} \cdot h; W_t = 10000 \cdot P_t \cdot h$$

式中, W_c 、 W_{nc} 和 W_t 分别为土壤毛管蓄水量、非毛管蓄水量和饱和蓄水量($t \cdot hm^{-2}$); 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 为计算土层深度(m),本研究按 0.2 m 深度计算。

利用 SPSS13.0 统计软件进行方差分析及土壤水分入渗过程的模拟。

2 结果与分析

2.1 不同浇灌方式下的土壤盐碱含量变化

方差分析表明,不同浇灌方式下,土壤 pH 值表现出显著性差异($F_{3,23} = 1820.508, P < 0.001$),由图 1 可知,采取不同浇灌方式后,芦苇土壤 pH 值均有下降趋势,灌溉后土壤 pH 值大小表现为清水灌溉<清废轮灌<再生水灌溉<未灌溉,与未灌溉土壤 pH 值(8.95)相比,清水灌溉、清废轮灌、再生水灌溉分别下降 4.9%、4.4%、1.3%,这主要是由于灌溉再生水 pH 值在 7.83—8.25 之间,清水 pH 值在 7.51—7.70 之间,灌溉水的 pH 值均小于当地土壤环境的本底值造成的。不同浇灌方式下,土壤含盐量表现出显著性差异($F_{3,23} = 41.172, P < 0.001$),与未灌溉土壤含盐量(0.39%)相比,再生水灌溉后土壤含盐量增加 12.8%,表现出一定的积盐负效应,这与其含有一定量的钠离子有关;而清水灌溉、清废轮灌分别下降 12.8%、7.7%,降盐作用明显,这与浇灌后的淋洗作用、芦苇对无机盐的吸收与吸附均有一定关系^[4]。

2.2 不同浇灌方式下的土壤容重和孔隙度

方差分析表明,不同浇灌方式下土壤容重表现出显著性差异($F_{3,23} = 306.410, P < 0.001$),由表 1 可知,与 CK 相比,不同浇灌方式下土壤容重均显著减小,其中清废轮灌下土壤容重最小,下降 15.9%,清水灌溉、再生水灌溉分别下降 11.9%、5.3%。不同浇灌方式下土壤总孔隙度($F_{3,23} = 4.926, P < 0.05$),毛管孔隙度($F_{3,23} = 4.665, P < 0.05$),非毛管孔隙度($F_{3,23} = 34.719, P < 0.001$)均表现出显著性差异($P < 0.001$),与 CK 相比,灌溉后土壤孔隙度状况均表现出增大趋势,大小表现为清废轮灌>清水灌溉>再生水灌溉>未灌溉,其中清

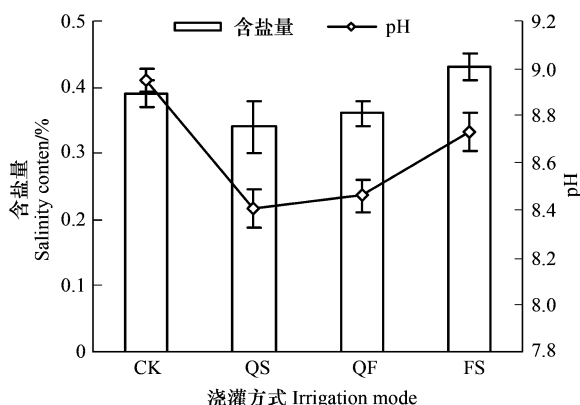


图 1 不同浇灌方式下土壤盐碱含量

Fig. 1 Soil saline alkali content under different irrigation mode

CK 为未灌溉,FS 为再生水灌溉,QF 为再生水清水轮灌,QS 为清水灌溉

废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉的土壤总孔隙度分别比未灌溉增加 18.8%、11.1%、9.1%，表明在改善土壤通气状况和透水性能方面清废轮灌比清水灌溉要好，而单一再生水灌溉在改善土壤容重和孔隙度方面的作用有限，这与其灌溉水质有一定关系。土壤容重和孔隙度的改善主要是由于采取不同浇灌方式后土壤体积表现出一定的膨胀现象，同时与土壤中的盐分被淋洗掉和芦苇对无机盐的可能性吸收有一定的关系^[4]。

表 1 不同浇灌方式下土壤容重和孔隙度状况
Table 1 Character of soil density and porosity under different irrigation mode

浇灌方式 Irrigation mode	土壤容重 Soil density / (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity / %	毛管孔隙度 Capillary porosity / %	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity / %
CK	1.51 ± 0.12a	41.34 ± 3.58C	39.23 ± 2.32B	2.11 ± 0.51c
QS	1.33 ± 0.15c	45.94 ± 4.12A	42.67 ± 3.05A	3.28 ± 0.48b
QF	1.27 ± 0.16d	49.11 ± 4.38AB	44.85 ± 4.02A	4.26 ± 0.31a
FS	1.43 ± 0.14b	45.10 ± 3.62AC	42.35 ± 3.12A	2.75 ± 0.42bc

CK 为未灌溉,FS 为再生水灌溉,QF 为再生水清水轮灌,QS 为清水灌溉;数据后有不同字母表示显著性差异达 0.05 水平(大写字母)、0.001 水平(小写字母)

2.3 不同浇灌方式下的土壤渗透性能

方差分析表明,不同浇灌方式下土壤初渗率($F_{3,23} = 12739.6, P < 0.001$)、稳渗率($F_{3,23} = 231.752, P < 0.001$)表现出显著性差异,由图 2 和表 2 可知,芦苇地土壤进行灌溉后,清废轮灌、清水灌溉的初渗率分别比 CK 增加 106.3%、50.8%,表明灌溉后增强了对降水的初始入渗性能,并且清废轮灌改善效果最好。而再生水灌溉后初渗率有减小趋势,与 CK 相比下降 15.0%。而清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉后稳渗率则表现为增加趋势,分别增加 87.0%、7.4%、3.7%。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^[16],本文采用 2 种入渗模型进行拟合分析(图 2)。

- ① 霍顿(Horton)公式
- $$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$
- 式中, 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。
- ② 通用经验公式
- $$f = at^{-n} + b$$
- 式中, f, t 分别为入渗率、入渗时间, a, b, n 均为经验参数。

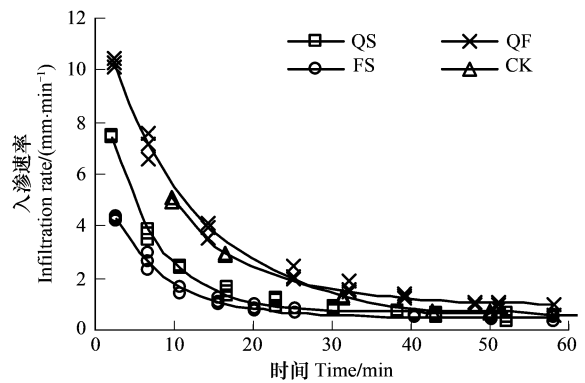


图 2 不同浇灌方式下土壤入渗特征曲线
Fig. 2 The characteristic curve of soil infiltration rate under different irrigation mode

表 2 不同浇灌方式下土壤入渗过程的模型拟合
Table 2 Models fitting of soil infiltration with pulp and paper wastewater under different irrigation mode

浇灌方式 Irrigation mode	实测参数 Measured parameters		Horton 模型参数 Parameters of Horton model				通用模型参数 Parameters of current model			
	f_0	f_c	f_0	f_c	k	R^2	a	b	n	R^2
CK	4.92	0.54	10.89	0.54	0.09	0.999	77.64	0.11	1.22	0.993
QS	7.42	0.58	9.89	0.67	0.16	0.997	12.72	0.34	0.51	0.996
QF	10.15	1.01	12.88	0.95	0.10	0.996	23.48	0.41	0.24	0.977
FS	4.18	0.56	6.26	0.51	0.15	0.981	8.99	0.31	0.64	0.945

2 种模型均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,即渗透初期的入渗率瞬变阶段,由于前期土壤含水量较低,水分在分子力的作用下,初始入渗率较高;其次为渗漏阶段,此阶段

下渗的水主要在毛细管引力和重力作用下,下渗率迅速递减;随着时间的推移,水分在重力作用下运行,下渗率维持稳定最后达到平稳阶段。采用 Horton 模型时, f_c 值在 $0.51\text{--}0.95\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,与实测值比较接近, k 值在 $0.09\text{--}0.16$ 之间,与 CK 相比 k 值偏大,表明再生水、清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 $0.11\text{--}0.41\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,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 模型拟合结果比通用模型更接近实测值,表明 Horton 模型比较适用于描述该模拟芦苇群落的土壤入渗特征。

2.4 不同浇灌方式下的土壤蓄水性能

方差分析表明,不同浇灌方式下的饱和蓄水量($F_{3,23} = 52.328, P < 0.001$)、毛管蓄水量($F_{3,23} = 22.252, P < 0.05$)、非毛管蓄水量($F_{3,23} = 165.062, P < 0.001$)均表现显著性差异。由表 3 可知,与 CK 相比,芦苇地饱和蓄水量增加明显,表现为清废轮灌 > 清水灌溉 > 再生水灌溉,分别比 CK 增加 11.5%、4.3%、2.4%。清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉的毛管蓄水量比 CK 分别增加 14.3%、8.8%、8.0%,这利于贮存对植物有效利用的水分,对其正常生理生态过程较有利。灌溉后非毛管蓄水量显著增加,清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉分别是 CK 的 2.0、1.6、1.3 倍,这能有效减少地表径流和增强涵养水源的功能,增强芦苇群落对降雨应急的水分贮存。土壤蓄水性能与前期含水量密切相关,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。本次测定时试验小区内土壤重量含水量差异不显著,均值为 $(25.13 \pm 1.31)\%$,把饱和蓄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],方差分析表明,涵蓄降水量($F_{3,23} = 46.464, P < 0.001$)差异性显著,再生水灌溉后,涵蓄降水量比 CK 下降 3.1%,而清废轮灌、清水灌溉分别比 CK 增加 31.5%、10.1%。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],方差分析表明,有效涵蓄量($F_{3,23} = 15.181, P < 0.001$)差异性显著,清废轮灌后有效涵蓄量比 CK 增加 15.7%,而清水灌溉、再生水灌溉分别下降 1.7%、12.9%。土壤蓄水性能的改善,主要与不同再生水浇灌方式后,土壤容重和孔隙度等基本物理性质的改善有较大关系。

表 3 不同浇灌方式下土壤蓄水特性

Table 3 Soil water-storage capacity under different irrigation mode

浇灌方式 Irrigation mode	饱和蓄水量 Total water-storage Capacity / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	毛管蓄水量 Capillary water-storage Capacity / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	非毛管蓄水量 Non-capillary water-storage capacity / ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	涵蓄降水量 Soil total absorption precipitation / mm	有效涵蓄量 Soil effective precipitation / mm
CK	$826.8 \pm 20.8\text{c}$	$784.6 \pm 40.5\text{C}$	$42.2 \pm 4.5\text{d}$	$41.81 \pm 3.1\text{c}$	$40.19 \pm 3.1\text{b}$
QS	$918.8 \pm 24.2\text{b}$	$853.3 \pm 10.1\text{B}$	$65.5 \pm 4.6\text{b}$	$46.05 \pm 2.8\text{b}$	$39.50 \pm 3.5\text{bc}$
QF	$982.2 \pm 30.5\text{a}$	$897.0 \pm 46.2\text{A}$	$85.2 \pm 5.2\text{a}$	$55.00 \pm 4.5\text{a}$	$46.48 \pm 4.5\text{a}$
FS	$902.0 \pm 31.5\text{b}$	$847.0 \pm 12.1\text{B}$	$54.9 \pm 4.5\text{c}$	$40.51 \pm 3.5\text{c}$	$35.01 \pm 4.1\text{c}$

3 讨论

从已有研究结果来看,灌水来源、再生水理化成分及灌溉频率等对灌溉地盐碱程度影响差异较大^[12,18],由于灌溉水的 pH 值均小于当地土壤环境的本底值,因此再生水灌溉、清废轮灌、清水灌溉对土壤碱度均有一定的稀释作用,并且压碱效果依次增强。再生水灌溉对该盐碱荒地的土壤盐分淋洗具有一定的限制作用,含盐量增加显著,可见连续的再生水灌溉容易出现积盐现象,这与多数研究报道一致^[9,14,18]。与未灌溉相比,该芦苇土壤进行再生水、清水及轮灌后,土壤容重减小,孔隙度增大,这与对沙漠人工林再生水灌溉后土壤容重和孔隙度的变化规律一致^[13-14],这与其再生水质量浓度相对较低、盐分被淋洗掉、芦苇对无机盐的吸收及其根系穿插造成的土壤体积膨胀等均有一定关系。

清水及清废轮灌增强了对降水的初始入渗性能,但再生水灌溉后在土壤表层留有一层致密的黑褐色土壤结皮,这可能是由于再生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^[13-14],土壤结皮的存在应是再生水灌溉后土壤初渗率下降的原因。而芦苇土壤稳渗率均有增强趋势,在

一定程度上能够保证较多的降水渗入土壤中储存,或形成壤中流、地下径流,达到保持水土、改良土壤的效果。Horton 模型及通用经验公式 2 种模型参数分析表明,灌溉后达到稳渗率的时间缩短,清水灌溉后其入渗率随时间递减程度高于清废轮灌和再生水灌溉,并且再生水、清水灌溉后从初渗率减小到稳渗率的时间缩短,从而提高其渗透性能,利于对水分的贮存。

清废轮灌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,其次是清水灌溉,而单一的再生水灌溉在涵蓄降水和贮蓄供植物利用的有效水分方面功能较弱,这与吴玉辉等研究发现采用芦苇根茎营养繁殖时,在移栽初期可先用河水灌溉 2 个月后再实行再生水灌溉的结论类似^[1]。综合来看,清废轮灌、清水灌溉的土壤蓄水性能好于单一的再生水灌溉,这主要是由于水分条件的改善使芦苇根系利于穿插于盐碱土壤中,土壤变的疏松,改善了土壤的孔隙状况(表 1),增大了芦苇地的通气和透水性(表 2,图 2),使其土壤蓄水能力增强(表 3)。

4 结论

再生水灌溉、清水灌溉及清废轮灌对芦苇地土壤的盐碱含量及水文效应产生显著影响,并且随着浇灌方式的不同表现出显著性差异。

(1)再生水灌溉、清废轮灌、清水灌溉对土壤碱度均有一定的稀释作用,并且压碱效果依次增强;清水灌溉、清废轮灌降盐效果显著,而再生水灌溉后土壤含盐量增加 12.8%。

(2)清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉后,土壤容重减小,孔隙度增大,特别是对该芦苇地土壤水文物理特性具有较好指示作用的非毛管孔隙度分别比未灌溉增加 101.9%、55.5%、30.3%,改善土壤水文物理效应表现为清废轮灌最好,其次为清水灌溉,而单一再生水灌溉较差。

(3)清水及清废轮灌增强了对降水的初始入渗性能,但由于再生水灌溉后土壤结皮的存在,其土壤初渗率有下降趋势;Horton 模型能较好反映不同浇灌方式后芦苇地土壤水分入渗过程。

(4)3 种浇灌方式均能增强芦苇地贮蓄和保持土壤水分的能力,清废轮灌、清水灌溉、再生水灌溉的饱和蓄水量分别比未灌溉增加 11.5%、4.3%、2.4%,涵蓄降水和供植物生长有效水分贮存能力表现为清废轮灌最好,其次为清水灌溉,而再生水灌溉则较差。

(5)从改良土壤盐碱、水文物理性质及贮蓄水分等土壤水文生态效应考虑,建议在进行造纸再生水灌溉黄河三角洲盐碱荒地芦苇群落时,以清废轮灌方式最好,清水灌溉优于单一的持续再生水灌溉。但该研究为室内土柱模拟实验,且土层相对较薄,研究结论应用到野外大田生境可能存在一定差异,因此要精确确定造纸再生水在芦苇群落盐碱荒地的资源化高效利用,还需从灌溉后土壤生物化学性状的变化、芦苇生长状况及生态经济效益等方面进行深入系统研究。

References:

- [1] Wu Y H, Li F Z, Xu W L. Influence on the growth of reeds after irrigation with rice straw pulping effluent. *China Pulp and Industry*, 2004, 25 (11): 55-56.
- [2] Song Y X. Discussion on papermaking wastewater treatment with reed ecological wetland system. *Journal of Environmental Management College of China*, 2005, 15(1): 66-67.
- [3] Wang X B, Sun C L. Effects on environment and economy of Huanghe River Delta with reed-soil disposing papermaking wastewater. *Environmental Management of China*, 2004, (1): 53-54.
- [4] Li J L, Lu Z H, Tian J Y, Wang L, Li P H, Xiao Z F. Bio-remediation of coastal saline-alkali marshy soil by irrigation with pulp and paper waste water. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(2): 281-286.
- [5] Khan S, Asghar M N, Rana T. Characterizing groundwater dynamics based on impact of pulp and paper mill effluent irrigation and climate variability. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 185(1/4): 131-148.
- [6] Singh S K. Effect of irrigation with paper mill effluent on the nutrient status of soil. *International Journal of Soil Science*, 2007, 2(1): 74-77.
- [7] Saxena M, Kumar A, Rai J P N. Microbial dynamics of pulp and paper mill effluent affected soil. *Indian Journal of Ecology*, 2002, 29(2): 227-232.

- [8] Patterson S J, Chanasyk D S, Mapfumo E, Naeth M A. Effects of diluted kraft pulp mill effluent on hybrid poplar and soil chemical properties. *Irrigation Science*, 2008, 26(6): 547-560.
- [9] Chen X M, Bai B, Huang D A. Effects of seawater irrigation on soil salinize-alkalization and saturation conductivity in Yellow River Delta. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (2): 50-54.
- [10] Miyamoto S, Arturo C. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77 (1/2): 28-38.
- [11] Lymbery A J, Doupe R G, Bennett T, Starcevic M R. Efficacy of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34 (1): 1-7.
- [12] Ding C, Wang S H, Yang C S. Influence on the soils of seashore wetland and the growth of pulp wastewater irrigated reeds. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 2-25.
- [13] Fu X Y, Ren J, Chen X M, Hou P Q, Zhan Z C, Bai W, Niu L. Effects of irrigation with papermaking wastewater on the physical property of the desert plantation soil. *China Pulp and Paper*, 2008, 27(10): 38-41.
- [14] Fu X Y, Niu L, Bai W, Zhan Z C, Hou P Q. Influence of pulp and paper wastewater utilization on soil physicochemical properties. *Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2007, 26(4): 93-96.
- [15] Luo H Y, Ding F J. *Experiment of Soil Science*. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1995: 63-68, 97-154.
- [16] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, Xu L H, Xiong W, Guo H. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (12): 6090-6098.
- [17] Xu J W, Li C R, Xia J B, Liu L J, Wang Y H. Soil hydrological properties of different forest types in lowlands of the Yellow River Delta. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 173-176.
- [18] Yang L L, Yang P L, Ren S M, Wang C Z. Experimental studies on effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 82-85.

参考文献:

- [1] 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的研究. *中华纸业*, 2004, 25(11): 55-56.
- [2] 宋迎新. 芦苇生态湿地系统处理造纸废水的探讨. *中国环境管理干部学院学报*, 2005, 15(1): 66-67.
- [3] 王希波, 孙翠玲. 芦苇湿地处理造纸废水技术对黄河三角洲经济和环境的影响. *中国环境管理*, 2004, (1): 53-54.
- [4] 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 王琳, 李鹏辉, 肖忠峰. 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2): 281-286.
- [9] 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. *农业工程学报*, 2006, 22 (2): 50-54.
- [12] 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. *生态环境*, 2005, 14(1): 21-25.
- [13] 伏小勇, 任珺, 陈学民, 侯培强, 展宗城, 白炜, 牛磊. 造纸废水灌溉对沙漠人工林土壤物理特性的影响. *中国造纸*, 2008, 27(10): 38-41.
- [14] 伏小勇, 牛磊, 白炜, 展宗城, 侯培强. 造纸废水资源化利用对土壤理化性质的影响. *兰州交通大学学报(自然科学版)*, 2007, 26(4): 93-96.
- [15] 骆洪义, 丁方军. *土壤学实验*. 成都: 成都科技大学出版社, 1995: 63-68, 97-154.
- [16] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 徐丽宏, 熊伟, 郭浩. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响. *生态学报*, 2008, 28 (12): 6090-6098.
- [17] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 刘立杰, 王月海. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 173-176.
- [18] 杨林林, 杨培岭, 任树梅, 王成志. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 82-85.