

造纸废水灌溉对轻度盐碱芦苇湿地理化性状的影响

刘 擎^{1,2}, 夏江宝², 贾 岱^{1,2}, 谢文军², 孙景宽², 陆兆华^{1,2}

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

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

摘 要: 为研究造纸废水灌溉对轻度盐碱退化芦苇湿地土壤改良效应的影响, 通过设置不同废水灌溉次数下的随机分组实验, 分析不同灌溉次数下芦苇湿土壤理化性质及酶活性的参数变化。结果表明: (1) 随着造纸废水灌溉次数的增加, 土壤容重有下降趋势, 土壤持水量、总孔隙度则呈上升趋势; 土壤 pH 呈显著下降趋势, 含盐量则表现为先下降后增加; (2) 土壤速效 N、速效 P、速效 K 含量随着造纸废水灌溉次数的增加呈显著上升趋势, 分别比 CK 增加 19.73%~73.42%, 14.32%~73%, 12.49%~60.6%, 4 次灌溉后上升趋势有所减缓; (3) 随着造纸废水灌溉次数的增加, 土壤脱氢酶显著增加, 比 CK 高出 1.4~2.8 倍, 而磷酸酶和脲酶分别高出 1.3~2.0 倍, 1.7~2.6 倍, 并在 4 次灌溉后增加趋势减缓; (4) 土壤微生物量碳含量随着造纸废水灌溉次数的增加呈现上升趋势, 比 CK 增加了 0.15~1 倍。该研究结果为黄河三角洲盐碱湿地造纸废水合理灌溉提供了试验依据。

关键词: 造纸废水灌溉; 土壤理化性质; 酶活性; 芦苇湿地

中图分类号: S274.1; S155.2+93; X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0258-04

Effects of Paper-making Wastewater Irrigation on Soil Physiochemical Property of Reed Wetland in Mild Saline-alkali Area

LIU Qing^{1,2}, XIA Jiang-bao², JIA Dai^{1,2}, XIE Wen-jun², SUN Jing-kuan², LU Zhao-hua^{1,2}

(1. Institute of Restoration Ecology, Chemical and Environmental Engineering College,

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory

of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China)

Abstract: To study the effect of paper-making wastewater irrigation on mild saline-alkali wetland and its improvement, through randomized experiment of setting up different wastewater irrigation frequency, the parameter changes of soil physical and chemical properties and wetland enzyme activity were analyzed under different irrigation frequency. Results show that: (1) With the wastewater irrigation frequency increasing, soil bulk density decreased, soil total porosity and water-holding capacity increased; soil pH decreased remarkably and after the first decrease, soil salt content increased; (2) Available N, P, K increased remarkably after irrigation. Compared with CK, available N, P, K increased by 19.73%~73.42%, 14.32%~73%, 12.49%~60.6%, respectively. The trend of rise slowed after 4 times irrigation; (3) Dehydrogenase activity increased remarkably, more than 1.4~2.8 times of CK. Phosphatase and urease activities increased 1.3~2.0, 1.7~2.6 times respectively compared with CK, and got a slow trend of rising after 4 times irrigation; (4) Microbial biomass carbon increased by 0.15 to 1 times compared with CK. The result provides the scientific basis for reasonable irrigation on saline-alkali wetland of Yellow River Delta with papermaking wastewater treatment. These results are also helpful for reasonable recycling and exploiting of papermaking wastewater.

Key words: irrigation of paper-making wastewater; soil physiochemical property; soil enzyme activity; reed wetland

制浆造纸工业是中国乃至世界经济的重要支柱产业之一, 纸与纸板的生

产占世界经济总产出 1%。我国在经济腾飞的同时, 对纸的需求迅速增加, 然而众所周知制浆造纸工业也是环境污染和能源消

收稿日期: 2011-01-17

修回日期: 2011-04-06

资助项目: 山东省科技发展计划项目 (2008GG10006024, 2008GG3NS07005); 滨州学院重大课题项目 (2008ZDL03)

作者简介: 刘擎 (1985-), 女, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 主要从事环境科学方面的研究。E-mail: liuqing@163.com

通信作者: 夏江宝 (1978-), 男, 山东安丘人, 博士, 副教授, 主要研究方向为植被恢复与生态重建。E-mail: xiajb@163.com

©1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

耗大户, 每生产一吨化学纸浆及纸需排出废水 350 t 左右, 对江河湖海的污染触目惊心。就中国而言, 自 20 世纪 90 年代以来, 制浆造纸每年排放的有毒废水近 24 亿 t, 居污水排放行业第 3 位, 而废水中化学需氧量(COD) 占总排放量的 41.8%, 居第 1 位^[1]。过去对于土地处理系统的研究侧重于生态控制污染与降解污染物等, 而对系统本身的吸纳能力和处理污染物方面的能力、限度缺乏必要的了解, 会造成过量的污染物和营养物质输入, 从而打破土地处理系统的平衡。目前在利用海水及其他微咸水、再生水、污水灌溉对滨海盐碱土壤的改良进行了相关研究, 提出了相应的灌溉模式^[2-5]。在造纸废水灌溉方面, 主要开展了造纸废水灌溉量对芦苇湿地土壤微生物、酶活性的影响^[6-9], 造纸废水灌溉模式对沙漠人工林^[10-11]、芦苇湿地^[12]土壤水文物理特性的影响及芦苇生长^[13]等方面的研究, 以探索造纸废水灌溉对盐碱化土壤的生态修复机理, 但不同造纸废水灌溉次数对黄河三角洲轻度盐碱退化芦苇湿地的土壤改良及植被恢复研究较少。

土壤作为土地处理系统中生命活动的场所。为植物生长提供养分, 土壤微生物、酶参与和加速生物化学过程, 推动土壤的代谢过程^[6]。土壤中 N 、 P 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 的含量则可以直接反映出土壤的健康状况, 可作为土壤的重要指标进行测定^[14-16]。本研究通过对轻度盐碱退化芦苇湿地土壤进行不同造纸废水灌溉次数的处理, 分析不同造纸废水灌溉次数对退化芦苇湿地土壤理化性质、酶活性及微生物的影响, 试图从理论和实践上为黄河三角洲退化盐碱湿地改良及造纸废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 试验地概况

试验地选择在沾化县城北 10 km 徒骇河东岸原生芦苇地。该区域属暖温带东亚季风大陆性半湿润气候, 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, 土壤多为滨海潮土和盐化潮土, 土体厚黏, 易板结, 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。淡水资源缺乏, 人均水资源量 265 m³, 过量的开采地下水引起的徒骇河河口海水的倒灌, 该试验区地下水矿化度高, 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。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。

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) 324 mg/L, pH 值 7.83~8.25, Na^+ 为 0.15%, Cl^- 为 0.16%, 矿化度 984 mg/L, 总氮(TN) 25.31 μg/ml, 总磷(TP) 4.664 μg/ml, 固体悬浮物(SS) 726.31 mg/L, 该造纸废水接近农田灌溉旱作灌溉水质标准。

在轻度盐碱地区, 选择生长较为均匀的芦苇群落采用随机分组进行试验小区布设, 设置造纸废水灌溉 1 次、灌溉 2 次、灌溉 3 次、灌溉 4 次共 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, 每处理重复 3 次, 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 50 mm, 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各项指标的测定, 为避免边缘效应, 土壤样品采集尽量在每小区中部, 按照 S 形样式每小区设 5 个取样点进行 0~20 cm 土壤层取样, 用四分法混合后取出一个土样, 每处理有 3 个重复, 风干过筛, 进行土壤养分和酶活性的测定。同样在每小区内从土壤表层进行 3 个环刀的取样, 以测定土壤基本物理性质。

1.3 测定方法

水质指标: 参照《水和废水监测分析方法》第四版; 土壤可溶性盐采用质量法, pH 值采用 pH 计(水土比 5:1), 微生物量碳(MBC) 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法; 碱解氮采用碱解扩散法, 速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 速效钾采用中性醋酸铵浸提-火焰光度法, 土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法, 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠法, 脱氢酶活性采用 TTC 比色法, 以 mg TPF/g, 24 h 表示; 以上指标均采用鲁如坤方法进行^[17]。环刀浸水法测定土壤容重、孔隙度及持水量等各项水文物理参数^[18]。

2 结果与分析

2.1 造纸废水灌溉对土壤基本物理性状的影响

土壤水文物理参数能够反映造纸废水灌溉后对芦苇湿地土壤基本物理性质的改良效果, 同时也能反映土壤蓄水, 调节水分的能力。由表 1 可知, 不同灌溉次数下的土壤容重表现出较大不同($p < 0.05$), 与对照相比, 废水灌溉下土壤容重均显著减小, 灌溉 1

~ 2 次, 土壤容重差异不显著($p > 0.05$), 分别比 CK 下降 3.31%、3.97%, 灌溉 3~ 4 次土壤容重显著减小, 分别比 CK 下降 8.61%、9.93%。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较大差异($p < 0.05$), 但灌溉 1~ 2 次的土壤总孔隙度、毛管孔隙度差异不显著($p > 0.05$), 而非毛管孔隙度差异显著($p < 0.05$)。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

表 1 不同造纸废水灌溉次数下的土壤容重和孔隙度变化

灌溉次数	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/ %	毛管孔隙/ %	非毛管孔隙度/ %	饱和持水量/ %	毛管持水量/ %	非毛管持 水量/ %
CK	1.51a	41.34d	39.23c	2.11d	29.44c	28.90c	0.54b
I ₁	1.46b	47.17c	44.32b	2.85d	30.61bc	30.37b	0.24c
I ₂	1.45b	47.69c	44.04b	3.65c	30.73bc	30.28b	0.45bc
I ₃	1.38c	52.05b	47.53a	4.52b	31.89b	31.53ab	0.36c
I ₄	1.36c	54.89a	48.63a	6.26a	33.87a	32.18a	1.69a

注: 造纸废水灌溉 1、2、3、4 次分别表示为 I₁、I₂、I₃、I₄, 未灌溉为对照 CK。同列数据后有不同小写字母表示显著性差异达 0.05 水平, 下同。

2.2 造纸废水灌溉对土壤盐碱化的影响

土壤 pH 值和含盐量是衡量盐碱湿地土壤环境质量的重要指标, 也是造纸废水灌溉后反映土壤改良的重要参数之一。由图 1 可知, 随着造纸废水灌溉次数的增加, 土壤含盐量表现为先降低后增加的趋势($p < 0.05$), 灌溉 1~ 2 次土壤含盐量分别比 CK 降低 6.33%、14.93%, 灌溉 3~ 4 次分别比 CK 增加 12.67%、13.57%, 表现出一定的积盐负效应。随着灌溉次数的增多, 土壤 pH 值有下降趋势($p < 0.05$), 与 CK 相比灌溉 1~ 2 次土壤 pH 值分别下降 4.5%、4.4%, 灌溉 3~ 4 次后, 土壤 pH 值下降最明显, 分别比 CK 下降 6.48%、7.60%。

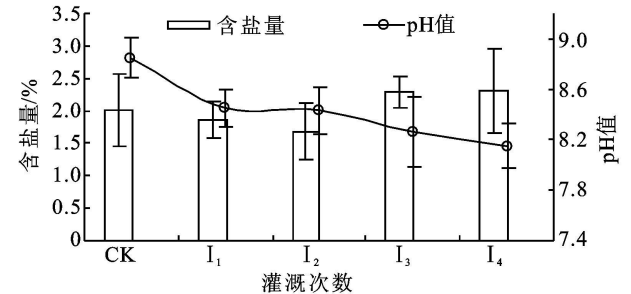


图 1 造纸废水灌溉下土壤盐碱含量变化

2.3 造纸废水灌溉对土壤营养成分含量的影响

由表 2 可知, 随着造纸废水灌溉次数的增加, 土壤中速效 N、速效 P、速效 K 的含量均呈先增加后降低的趋势, 差异性显著($p < 0.05$)。灌溉 1~ 3 次土壤速效 N 含量分别比 CK 增加 33.86%、48.64%、73.42%, 速效 P 分别增加 14.32%、35.20%、73.00%, 速效 K 分别增加 12.49%、33.61%、60.60%。灌溉 4

14.10%、15.36%、25.91%、32.77%。随着灌溉次数的增加, 土壤饱和持水量、毛管持水量呈现上升的趋势。灌溉 1~ 4 次后, 土壤饱和持水量分别比 CK 增加了 3.9%、4.3%、8.3%、15%; 毛管持水量分别比 CK 增加了 5.1%、4.7%、9.1%、11.3%; 而非毛管持水量在废水灌溉后呈现出先下降后上升的趋势, 灌溉 1~ 3 次, 分别比 CK 减少 55.5%、16.7%、33.3%, 灌溉 4 次后与 CK 相比增加 3 倍。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。

次后速效 N 含量比 CK 仅增加 19.73%, 速效磷增加 24.91%, 速效 K 增加 36.96%。可见废水灌溉在很大程度上提高了土壤中 N、P、K 的含量, 但随着芦苇生长季的结束和环境温度的降低, 土壤营养成分呈现出一定程度的降低^[7,9]。

表 2 造纸废水灌溉下土壤速效 N、速效 P、速效 K 的变化

灌溉次数	AN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	AP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	AK/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	21.03e	6.215d	98.97d
I ₁	28.15c	7.105cd	111.34c
I ₂	31.26b	8.403bc	132.23b
I ₃	36.47a	10.752a	158.95a
I ₄	25.18d	7.763c	135.55b

2.4 造纸废水灌溉对土壤酶活性的影响

土壤酶活性具有相对稳定性, 是灵敏可靠的土壤肥力指标之一, 同时也是土壤自净能力评价的一个重要指标, 能够反映土壤对植物根系供应养分的潜在能力。由图 2 可知, 随着造纸废水灌溉次数的增加, 土壤中酶活性具有显著变化($p < 0.05$), 废水灌溉后, 由于供氢体的增加, 脱氢酶活性有升高的趋势, 灌溉 1~ 2 次后比 CK 高出 1.4 倍、1.6 倍; 灌溉 3~ 4 次后变化最大, 分别相当于 CK 中脱氢酶含量的 2.6、2.8 倍。而脲酶和磷酸酶由于受季节和气温的影响, 则呈现先升高后降低的趋势, 灌溉 1~ 3 次后脲酶含量分别比 CK 高出 1.7 倍、2.2 倍、2.6 倍, 磷酸酶含量高出 CK 1.3 倍、1.6 倍、2.0 倍, 灌溉 4 次后脲酶和磷酸酶含量略微下降, 分别高出 CK 2.1 倍、1.6 倍。可见随着造纸废水灌溉次数的增加, 退化芦苇湿地土壤酶活性呈现一定的增高趋势。

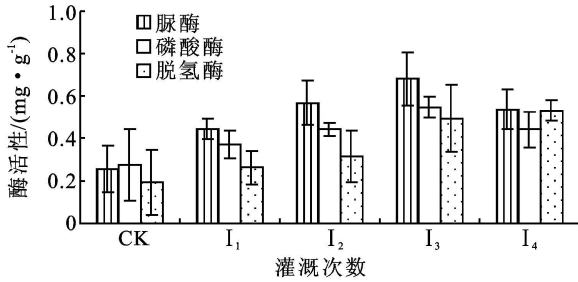


图 2 造纸废水灌溉下脲酶、磷酸酶、脱氢酶活性

2.5 造纸废水灌溉对土壤微生物量碳的影响

土壤微生物量碳是土壤微生物量的表现形式,能体现湿地微生物的数量和活性,能较早地预测土壤质量的变化,是土壤质量变化最敏感的指标之一,同时也是土壤健康的决定性因素,其值越高,土壤活性越强。由图 3 可见,随着废水灌溉次数的增加,土壤微生物量碳有升高的趋势($p < 0.05$),由于受降雨的影响,湿地土壤含水量增加较多,灌溉 1~2 次后土壤微生物量碳变化并不显著($p > 0.05$),仅比 CK 增加 14.05%、38.29%。随着季节变化,芦苇生长季结束,土壤湿度和温度降低,灌溉 3~4 次后,土壤微生物量碳明显升高,灌溉 3 次后比 CK 增加 71.73%,而灌溉 4 次后相比 CK 增加了一倍。

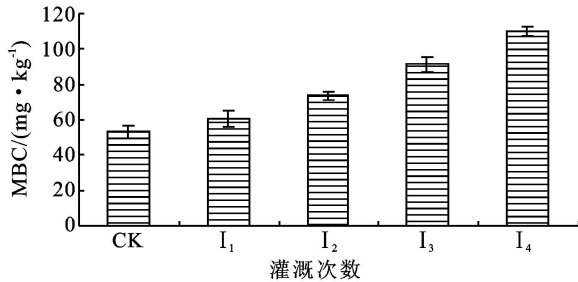


图 3 造纸废水灌溉下土壤微生物量碳变化

3 结论

(1) 与未灌溉相比,造纸废水灌溉后土壤物理性质有所改善,灌溉 1~2 次对土壤容重,孔隙度,持水量改变均不显著,在灌溉 3~4 次后土壤孔隙度增大、容重减小明显,即土壤透气、透水性能有了显著提高,有利于植物根系与土壤间的水分、空气、热量的传递。

(2) 废水灌溉在一定程度上降低了土壤的盐碱度,随着造纸废水灌溉次数的增加,土壤 pH 有所下降,在灌溉 3~4 次后土壤碱度相比 CK 显著下降,表明废水灌溉在一定程度上对土壤碱度有稀释的效果, pH 值的降低利于植物的生长及对 P 元素的吸收,而含盐量表现为先下降后升高。

(3) 由于造纸废水中含有一定的残留纤维等有机物带来的营养物质,随着废水灌溉次数的增加,土

壤中 N、P、K 的含量有升高趋势,在灌溉 1~3 次后 N、P、K 的含量显著提高。由于受季节和环境温度的变化,灌溉 4 次后表现出一定的下降趋势,表明废水灌溉在一定程度上改善了土壤的营养状况,为植物生长提供了必须的营养物质。

(4) 随着造纸废水灌溉次数的增加,土壤脲酶、磷酸酶和脱氢酶的活性均具有不同程度的提高,在灌 1~3 次后,脱氢酶、磷酸酶及脲酶活性显著提高;在废水灌溉 4 次后,脱氢酶活性提高并不显著,而磷酸酶和脲酶的活性相对有所下降,可能与植物生长季结束,温度降低引起土壤环境的改变有一定关系。

(5) 与未灌溉相比,随着灌溉次数的增加,土壤微生物量碳有升高趋势,灌溉 1~2 次后土壤微生物量碳变化并不显著,可能与雨季芦苇湿地土壤积水有一定关系;灌溉 3~4 次后土壤中微生物量碳呈现显著升高,表明造纸废水灌溉能够提高土壤微生物活性。

参考文献:

- [1] 潘蓓蕾. 积极行动起来,为造纸工业防止污染做出贡献[J]. 中国造纸, 1994, 27(4): 3-5.
- [2] 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.
- [3] 罗廷彬, 任威, 李彦, 等. 咸水灌溉条件下干旱区盐渍土壤盐分变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(2): 166-170.
- [4] Miyamoto A. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 77: 28-38.
- [5] Alan J, Lymbery R G, Doup 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.
- [6] 严金龙, 全桂香, 丁成. 造纸废水灌溉对土壤性质及脲酶活性的影响[J]. 中国造纸学报, 2008, 23(4): 58-60.
- [7] 李甲亮, 田家怡, 李学平. 造纸废水灌溉对芦苇湿地微生物的影响研究[J]. 海洋湖沼通报, 2009(4): 163-170.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.
- [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]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4): 93-96.

(下转第 267 页)

$$K = \alpha \theta^m \quad (3)$$

式中: α, m ——经验系数。

在毛细管水上升高度的范围内, 其含水量是随高度的增加而减小, 因此, 非饱和土壤的渗透系数 K 随毛细管水上升高度的增大而减小。由式(1)和式(3)可知, 在毛细管水上升初期, z 值较小, $\nabla \varphi$ 与 K 值较大, 所以毛细管水上升速度快; 随着高度的增加, $\nabla \varphi$ 与 K 值逐渐减小, 所以毛细管水上升速度变慢; 当毛细管水上升达到最大高度时, $\nabla \varphi = 0$, 上升速度 $v = 0$, 即毛细管水运动达到平衡状态^[6]。

本试验发现当毛细管水由粒径小于 0.1 mm 细粒土壤层进入粒径 0.5~0.25 mm 粗粒土壤层的界面时, 发生毛细管水滞留现象。非饱和土壤的总势是由重力势和基模势组成的, 细粒土壤基模势大于粗粒, 但基模势总是一个负值^[5]。当毛细管水由细粒土壤进入粗粒土壤层界面时, 界面下的总势大于界面上总势, 毛细管水停止上升, 随着细粒土壤中含水量的增加, 基模势逐渐减小, 当界面下基模势小于界面上基模势时, 毛细管水进入粗粒土壤层, 此时湿润锋面处的基模势取决于界面上粗粒土壤的性质^[7]; 反之, 当毛细管水由粗粒进入细粒后, 基模势的大小取决于细粒土壤。这就是为什么毛细管水透过下部土壤层到达上部后, 毛细管水上升高度取决于上部土壤层的性质。

对于成层土壤, 当上部土壤层含水量增大, 基模势减小, 降低了上下层势差, 同时也会影响毛细管水上升过程中空气的排出。所以试样 10 在开始阶段毛细管水上升速度低于试样 9, 但毛细管水最终上升高度还是由上部土壤层性质决定。如果上部土壤层处于完全隔水状态, 其毛细管水上升会停止。

3 结论

土壤构造、颗粒大小、含水量对毛细管水上升高度有着明显的影响^[8]。本文通过室内观测毛细管水上升试验, 对层状土壤毛细管水运动特征进行了研究。研究表明: (1) 成层性构造土壤, 当下部土壤层厚度小于毛细管水上升的最大高度, 毛细管水最终上升高度是由上部土壤层的性质所决定的; (2) 上部土壤层颗粒愈细, 含水量愈大, 会减缓毛细管水上升的速度, 如果上部绝对隔水, 毛细管水不上升。

土壤中的水分可以通过毛管作用供给土壤蒸发。由本文试验所得规律可以对层状土壤毛细管水运动特性进行预测, 从而为研究土壤改良和灌溉排水提供重要参考。

参考文献:

- [1] 高大钊. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 23-25.
- [2] 孔宪立, 石振明. 工程地质学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 65-75.
- [3] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 190-199.
- [4] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程(JTG E40-2007)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [5] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 66-73.
- [6] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 167-170.
- [7] 何克瑾, 费良军, 尹娟. 均质土壤上升毛管水运动特性试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 581-585.
- [8] 王丁, 费良军. 层状土壤上升毛管水运移特性实验研究[J]. 地下水, 2009, 31(1): 35-37.

(上接第 261 页)

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Patterson S J, Chanasysk 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.

- [15] 张祯, 荀久玉, 孔锦. 土壤电导率的测定中影响因素研究[J]. 科技信息: 学术版, 2007(28): 76-77.
- [16] 高凯, 朱铁霞, 任杰, 等. 同地表条件对盐碱土壤 N、P、K 含量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2008, 23(5): 552-554.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 106-253.
- [18] 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.