

造纸废水灌溉对湿地土壤和芦苇中总磷迁移的影响

吕明波 郭成久 苏芳莉* 李海福
(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要 在沈阳农业大学综合试验场内构建小试装置模拟辽河口天然芦苇湿地,对不同生育期湿地土壤和芦苇总磷含量的变化进行研究,分析废水灌溉条件下湿地土壤总磷的迁移特征。结果表明:不同废水质量浓度灌溉条件下,随着土层深度增加,土壤总磷含量变化趋势基本相同,在5~10 cm土层中总磷含量最高。废水灌溉组土壤总磷含量在土层剖面分布规律为0~5 > 5~10 > 20~40 > 40~60 > 10~20 cm。废水质量浓度为300 mg/L处理的土壤总磷含量变化量最大,175 mg/L处理最小。芦苇总磷含量随生长期变化趋势为成熟期 > 拔节期 > 抽穗期 > 展叶期 > 发芽期。灌溉组芦苇中总磷含量高于对照组,总磷含量在芦苇内的分布特征为:茎 > 叶 > 根 > 穗。相关性分析表明,土壤总磷、总氮、有机质及芦苇总磷呈极显著正相关关系,总磷与pH相关不显著。

关键词 造纸废水;灌溉方式;湿地;芦苇;总磷

中图分类号 S153

文章编号 1007-4333(2017)01-0085-09

文献标志码 A

Effect of papermaking wastewater irrigation on the total phosphorus migration in soil and wetland reed

LV Mingbo, GUO Chengjiu, SU Fangli*, LI Haifu

(College of Water Resource, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract A small pilot plant was built to simulate Liaohe river estuary natural reed wetland in comprehensive test venue at Shenyang Agricultural University and investigate the variation of total phosphorus content in soil and reeds at different growth stages. The results show that: Under different concentrations of wastewater irrigation, with the increase of soil depth, changes of soil total phosphorus content displayed the same trend, and the highest total phosphorus content existed at 5 - 10 cm soil layer. Soil phosphorus content in waste water irrigation group distribution in soil profiles was: 0 - 5 > 5 - 10 > 20 - 40 > 40 - 60 > 10 - 20 cm. Total phosphorus content variation irrigation concentration reached maximum at 300 mg/L soil treatment and minimum at 175 mg/L. Reeds growing trend with the total phosphorus content was mature > jointing stage > heading stage > leaf stage > germination stage. Irrigation group reeds phosphorus content was higher than in control group, and its content distribution in the reed was stem > leaf > root > ear. Correlation analysis showed that soil total phosphorus, total nitrogen, total phosphorus organic matter and reed showed significant positive correlation while the correlation between pH and total phosphorus was not significant.

Keywords paper wastewater; irrigation methods; wetlands; reed; total phosphorus

辽河口湿地是亚洲第二大芦苇湿地^[1],同时是辽河口入海的最后一道屏障^[2],该区也是石油和粮食重要的生产基地^[3]。近年来水资源衰减并不断加

剧,地下水补给条件差,天然降水不足,位于湿地内部的造纸废水沿河分布,造纸废水来源于辽宁金城造纸厂,且直接流经湿地,湿地废水灌溉不可避

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31470710,31570706); 辽宁省教育厅科学研究项目(LSNYB201609,L2013263)

第一作者: 吕明波,硕士研究生,E-mail:2722543635@qq.com

通讯作者: 苏芳莉,教授,博士生导师,主要从事农业水土环境及水土保持与生态环境评价研究,E-mail:sufangli8@163.com

免^[4]。马欣等^[5]对黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地造纸废水灌溉进行研究发现,灌溉后芦苇能够生长,土壤理化性质明显得到改善。国外对于废水灌溉对农作物及土壤的研究表明,废水灌溉既有利于缓解缺水问题^[6],还能为农作物提供所需的养分,促进农作物产量增加^[7],同时为土壤提供充足的养料^[8],改善盐碱地土壤的营养状况,提高微生物数量和土壤酶活性^[9-10],又可促进芦苇的生长^[11]。国内对废水灌溉芦苇湿地已有了初步的研究,主要研究灌溉后芦苇的质量、土壤的养分^[12]及重金属的含量^[13]变化情况。对于废水灌溉条件下湿地土壤和芦苇中总磷迁移的研究较少^[14],磷是湿地植物生长、发育的必须营养元素^[15],在湿地土壤中的含量大小直接影响着湿地生态系统的生产力^[16],同时也是导致湿地及其水体发生富营养化的主要限制性因子^[17]。造纸废水灌溉后,土壤中的总磷含量随着灌溉年限的增加而增大^[18]。

综上,造纸废水灌溉对土壤有一定的改良效果,土壤中总磷含量直接影响湿地芦苇的生长状况,以往对土壤总磷含量在土层剖面和植物的影响研究颇多,对造纸废水处理下,总磷在湿地土壤中的变化规律研究尚鲜见报道。本研究拟通过构建小试装置模拟辽河口天然湿地,应用造纸废水灌溉芦苇湿地,分析不同灌溉时期和不同废水质量浓度与湿地土壤和芦苇中总磷含量的关系,旨在研究造纸废水灌溉对湿地土壤和芦苇中总磷含量迁移的影响,为造纸废水灌溉对辽河口湿地生态修复及环境保护的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

辽宁双台河口湿地位于松辽平原亚区辽河平原,距盘锦市区 35 km,有 118 km 长的海岸线,是中国高纬度地区面积最大的滨海芦苇沼泽区。湿地植物属华北植物区,种类比较单一,以芦苇(*Phragmites australis*)和碱蓬(*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in Bull)为主要群种。本区地貌类型为冲积平原,地势平坦、开阔,河道明显,多苇塘泡沼和海域滩涂。湿地的成土物质主要来源于河水携带的大量泥沙沉积而成,土壤以沼泽土、盐土、潮滩土为主,区域气候属暖温带大陆性半湿润半干旱季风气候。

试验于 2015 年在沈阳农业大学综合试验场内进行。小试装置的试验池建于 2009 年,采用混凝土砌筑,池壁及底部做防渗处理。池壁一侧在地表 0.25 m 以上安装上 4 个出水管,分别用来接取 4 种不同土壤深度下的水样,每层水深为 10 cm。试验池埋入基础深为 1 m,超过我国北方地区冻土深度,为防止冻胀,池壁出露地面高度 1 m,池内装土 0.7 m,保持土壤表层有 0.1 m 深土层,以模拟湿地水淹状态。每个试验池底部为长方形,长×宽=2.0 m×1.0 m,用辽河口湿地土壤垫高约 0.2 m(图 1)。将芦苇移栽至试验池内,每个试验池的平均芦苇株数约为 1 250 株,栽植的株距×行距为 0.04 m×0.04 m,移栽完毕后,对上部进行覆土,覆土厚度约为 0.2 m。

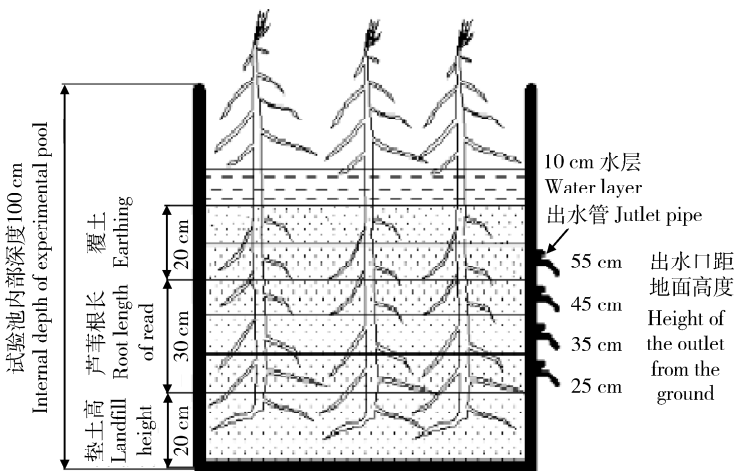


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental device schemes

1.2 试验设置

按水利行业标准 SL13—2015《灌溉试验规范》中划分作物生育阶段的标准,将芦苇整个生长季划分为发芽、展叶、拔节、抽穗、成熟 5 个生长期。本试验在芦苇的整个生长期设置 6 个灌溉期,3 种废水灌溉质量浓度。具体试验设置为:1)废水灌溉时期设置:不同生育期初期灌 1 次废水,一次性灌入 3 种不同质量浓度的造纸废水,其余时期灌入清水,维持 0.1 m 深水层保证芦苇正常生长。根据芦苇的 5 个生长期,每个生长期设置 3 个重复试验。2)废水灌溉质量浓度设置:化学需氧量(Chemical oxygen demand)是衡量水中有机质含量的重要指标,化学需氧量越大,水体污染越严重^[19]。利用造纸废水中含有丰富的有机质营养元素,能够促进芦苇植物生长和改善土壤理化性质的特点。依据原始最高 COD_{Cr} 质量浓度设计,即根据废水原始 COD_{Cr} 质量浓度(300 mg/L),用清水与其混匀配成 3 个 COD_{Cr} 质量浓度梯度,分别约为 300、175 和 50 mg/L,依次为处理 1、处理 2、处理 3。3)废水灌溉量设置:采用体积控制。每个试验池的灌水深度为 10 cm,

计 0.2 m³,余后用清水灌入,保持水面 10 cm 将调配好的溶液用塑料桶从同一层灌入试验池。灌入的清水为自来水,经测定自来水磷离子含量几乎为零,忽略对试验结果的影响。

1.3 供试土壤

供试土壤均取自辽河口湿地,为湿地原状土壤。于 2009 年 3 月底用挖掘机挖出后,汽车运回沈阳农业大学综合试验场,按湿地土层顺序分层填入小试装置。填入深度为 0.9 m,沉实后为 0.7 m。该湿地土壤类型为草甸土,容重为 1.03 g/cm³,pH 为 8.51,有机质含量为 1.05%。

1.4 供试废水

供试废水取自辽宁省金城造纸厂排污口,为金城造纸厂经过处理后排放的造纸废水。按照试验设计,每个灌溉期前一周取供试废水 19 桶,每桶 50 L,盖盖密闭封号。汽车运回沈阳农业大学综合试验场内,置于阴凉处。用苫布盖好遮光保存,尽快调配灌溉。2009—2015 年,每年的 04—10 月共取 4 次,经测定,供试废水 pH 为 7.6,其他主要成分见表 1。

表 1 灌溉废水主要成分质量浓度

Table 1 The mass concentration of the main component in irrigation water

指标名称	化学需氧量	生化需氧量	水中悬浮物	镍	铅	铜	钙	镁	总磷	总氮
Index name	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	Ni	Pb	Cu	Ca	Mg	TP	TN
指标值	300	160	140	0.46	1.37	0.6	118.8	36.31	3.41	29.5
Index value										

1.5 供试植物

供试植物于 2009 年 3 月底取自辽河口湿地,品种为辽滨苇、盘锦苇、小紫散穗等当地品种天然混栽芦苇。趁芦苇尚未萌动,在允许采挖的苇场内挖取无病虫害长势良好且有至少 3 个芽眼的芦苇根状茎,截成 0.2 m 左右的茎段,用湿润的麻袋包好捆住,上面淋水保持湿润,运回沈阳农业大学综合试验场内,立即移栽至试验池土壤中,浇水保证成活。

1.6 样品采集、处理及测定方法

1)土壤样本的采集时间为每个生长期初期灌溉造纸废水的前 1 天,土样按照“S 形”布点,每个试验池取 5 个样点。采用直径 6 cm、高 1 m 的取土钻分 5 层取土,分为 0~5、5~10、10~20、20~40 和 40~60 cm,混合后,用 7 号自封袋盛装,放于阴凉通风处进行风干,待土样风干后过筛(0.5 mm)去除根后

研磨,再过 0.149 mm 孔筛后装袋,备用。

2)芦苇采样时间与土壤采样时间保持一致,选择每个试验池中长势较好 10 株,贴地面剪下,放入事先装好冰块的塑料袋内,经杀青处理后,研磨装入密闭自封袋中备用。

3)土壤总磷的测定,采用 GB 8937—1988《土壤总磷测定法》氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;植物总磷的测定,采用硫酸—过氧化氢联合消煮法;土壤总氮的测定,采用凯氏消煮法-半微量蒸馏法;土壤有机质的测定,采用重铬酸钾容量法;土壤 pH 的测定,采用笔式酸度计直接测定。土壤总磷含量变化量是每个生长期测得的土壤总磷含量减去每个生长期的土壤总磷含量的基体值。

数据处理和图表绘制应用 Excel 软件,用 SPSS 统计软件对结果进行差异性检验,多重比较和多因

素方差分析。

2 结果与分析

2.1 造纸废水灌溉对土壤总磷含量的影响

2.1.1 对发芽期土壤总磷含量的影响

发芽期灌溉不同质量浓度的造纸废水,土壤总磷含量总体比CK含量高。0~5 cm 土层中总磷含量最高,呈现处理 1>处理 2>处理 3>CK 的趋势(图 2(a))。5~10 cm 土层中总磷含量有所下降,随后 10~20 cm 土层中总磷含量有所升高,在 20~40 cm 土层中总磷含量持续升高,在 40~60 cm 土层中总磷含量缓慢下降。结果表明:质量浓度为 300 mg/L 的处理在 0~5 cm 土层中总磷含量要比 50、175 mg/L 处理高,分别为 0.06 和 0.04 g/kg。不同质量浓度之间差异显著($P<0.05$)。因为 300 mg/L 废水处理中总磷含量太高,而不能被发芽期的芦苇所吸收,从而在土壤表层中产生了积累。

总体上,土壤总磷含量变化量基本呈现处

理 1>处理 3>处理 2 的趋势(图 2(b))。质量浓度为 300 mg/L 的废水处理后的土壤总磷含量变化量波动较小,在 0~5 cm 土层有所增加,在 20~40 cm 土壤中总磷含量变化量最大,这是由于总磷因淋洗向下迁移的缘故,去除效果最好。质量浓度为 50 mg/L 的废水处理,土壤总磷含量变化量在 0~10 cm 土层变化量较小,但在 40~60 cm 土层总磷含量变化量最大,去除效果最好。质量浓度为 175 mg/L 的废水处理,土壤总磷含量变化量逐层升高,在 20~40 cm 土层处土壤总磷含量变化量达到最大值。在 CK 处理下,土壤总磷含量变化量在各土层中分布比较均匀。除了清水灌溉对土壤总磷含量变化量没有太大的影响外,质量浓度为 50、175 和 300 mg/L 的废水处理对土壤总磷含量变化量影响较大。结果表明:质量浓度为 300 mg/L 的废水灌溉下,对芦苇发芽期土壤总磷变化量影响较大,由于发芽期芦苇对磷素需求较小,而过剩的磷素向下发生淋洗。

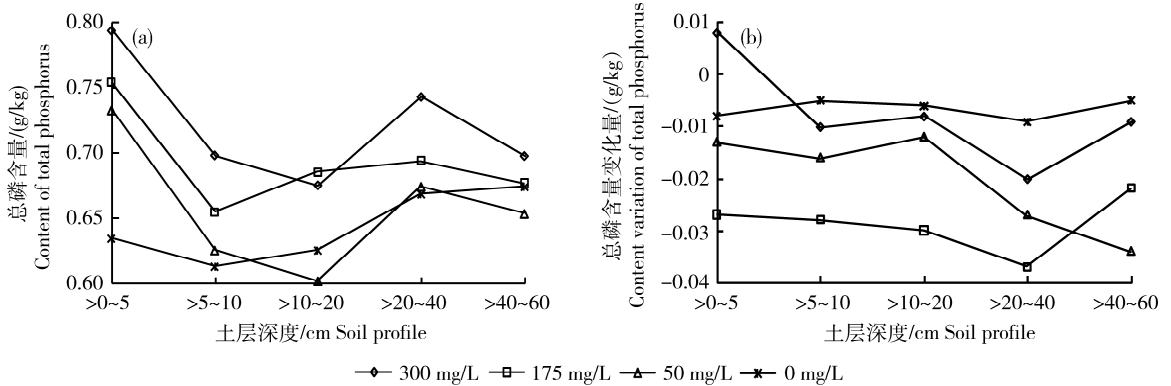


图 2 发芽期不同土层深度土壤总磷含量(a)和变化量(b)

Fig. 2 Content (a) and variation (b) of total phosphorus in different soil layers during germination period

2.1.2 对展叶期土壤总磷含量的影响

展叶期灌溉不同质量浓度的造纸废水,土壤总磷含量与发芽期土壤总磷含量变化趋势基本相似(图 3(a))。在 0~5 cm 土层总磷含量较高,呈现处理 1>处理 2>处理 3>CK 的趋势,说明总磷在此层迅速积累,可能与微生物作用有关,需进一步探讨。0~10 cm 土层中总磷含量有所下降,随后 10~20 cm 土层中总磷含量有所升高,在 20~40 cm 土层中总磷含量持续升高,在 40~60 cm 土层中总磷含量缓慢下降。结果表明:质量浓度为 300 mg/L 处理下,在 0~5 cm 土层中总磷含量要比 50、

175 mg/L 处理高,随后 10~40 cm 土层总磷含量缓慢增加,可能原因是由于植物对总磷的吸收较小。

土壤总磷含量变化量呈现处理 1>处理 3>处理 2 的趋势(图 3(b))。在 0~5 cm 土层总磷含量变化量较高,在 10~20 cm 土层总磷含量变化量降低,在 40~60 cm 土层总磷含量变化量有所升高。结果表明:质量浓度为 300 mg/L 处理下,对芦苇展叶期土壤总磷变化量影响较大,对芦苇吸收土壤总磷有一定的影响。在 10~20 cm 土层总磷含量变化量持续减小,在 40~60 cm 土层总磷含量变化量有所升高,由于总磷向下迁移到深土层的缘故。

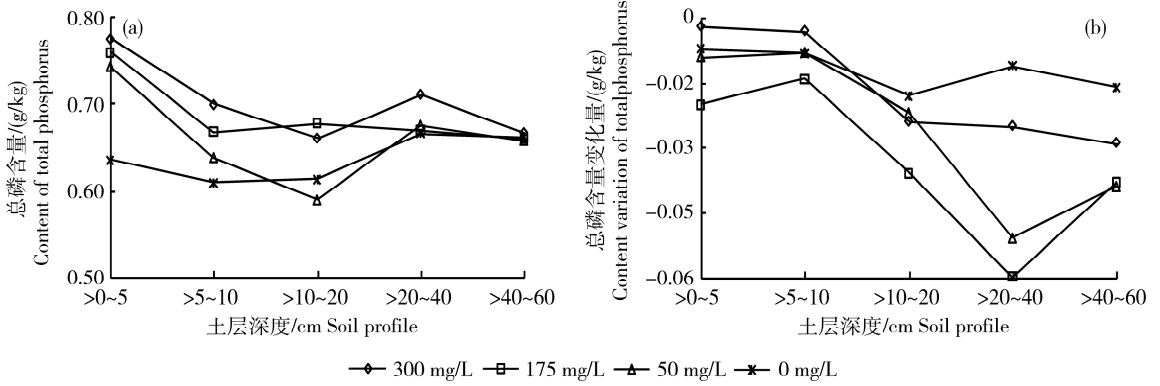


图 3 展叶期不同土层深度土壤总磷含量(a)和变化量(b)

Fig. 3 Content (a) and content's variation (b) of total phosphorus in different soil profile in the period of leaf expansion

2.1.3 对拔节期土壤总磷含量的影响

拔节期灌溉不同质量浓度的造纸废水，土壤总磷含量与发芽期、展叶期土壤总磷含量变化在土壤剖面中变化趋势基本相似(图 4(a))。在 0~5 cm 土层总磷含量较高，呈现处理 1>处理 2>处理 3>CK 的趋势，在 5~20 cm 土层中，土壤总磷含量呈下降趋势，在 20~40 cm 土层总磷含量呈上升趋势，40~60 cm 土层中，土壤总磷含量呈下降趋势。

土壤总磷含量变化量呈现处理 1>处理 3>处理 2 的趋势。不同土层中总磷含量变化量的变化趋势基本相似(图 4(b))。在 0~40 cm 土层处，总磷含量变化量持续减小，在 40~60 cm 土层处，总磷含量变化量呈缓慢增加趋势。结果表明：芦苇在拔节期，质量浓度为 300 mg/L 处理下，对芦苇生长有促进作用，随着土层的增加总磷含量减少，这是由于芦苇根系吸收土壤中磷素营养因子与微生物在土层的活动范围所致。

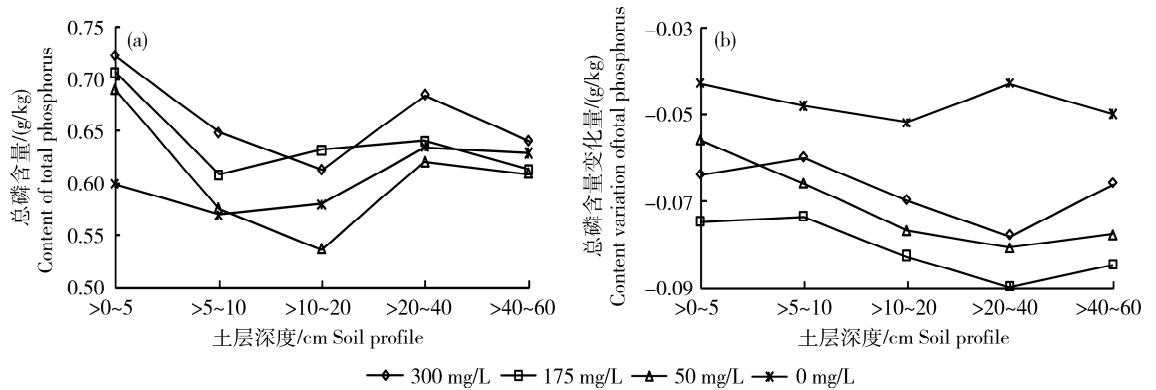


图 4 拔节期不同土层深度土壤总磷含量(a)和变化量(b)

Fig. 4 Content (a) and content's variation (b) of total phosphorus in different soil profile in the period of jointing

2.1.4 对抽穗期土壤总磷含量的影响

抽穗期灌溉不同质量浓度的造纸废水，土壤总磷含量与发芽期、展叶期、拔节期土壤总磷含量变化趋势基本相同，总体上均大于 CK(图 5(a))。在 0~5 cm 土层总磷含量较高，呈现处理 1>处理 2>处理 3>CK 的趋势，随着土层的增加，土壤总

磷含量逐渐降低。在 0~5 cm 土层中，质量浓度为 300 mg/L 处理的土壤总磷含量达到最大值，这是因为此时温度降低，土壤微生物活性降低，对土壤有机质分解作用有所减弱，而且芦苇处在抽穗期对磷素的吸收，使得土壤总磷含量出现下降趋势。

土壤总磷含量变化量的趋势与发芽期、展叶期、拔节期相似,呈现处理 1>处理 3>处理 2 的变化趋势(图 5(b))。土壤总磷含量变化量随着土层深度加深而减少,在 40~60 cm 处土壤中总磷含量变化

量减少最明显。结果表明:质量浓度为 300 mg/L 处理的土壤总磷含量变化量较高,芦苇对其的吸收较小,加之废水中有大量的总磷造成土壤中总磷的在表层迅速积累。

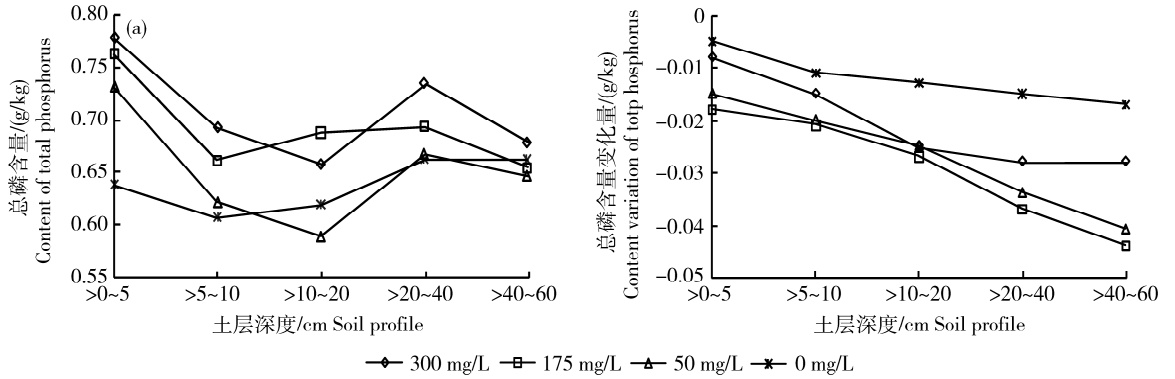


图 5 抽穗期不同土层深度土壤总磷含量(a)和变化量(b)

Fig. 5 Content (a) and content's variation (b) of total phosphorus in different soil profile in the heading period

2.1.5 对成熟期土壤总磷含量的影响

成熟期灌溉不同质量浓度的造纸废水,土壤总磷含量与发芽期、展叶期、拔节期、抽穗期土壤总磷含量变化趋势相同,各废水处理下土壤总磷含量均大于 CK(图 6(a))。在 0~5 cm 土层总磷含量较高,呈现处理 1>处理 2>处理 3>CK 的趋势,土壤总磷含量达到最大值,总磷含量随着土层深度增加其含量不断减少。由于此时,温度更低,微生物对土壤中的有机质及废水中的有机质分解作用减弱,成熟期芦苇对磷素的吸收减弱,使得土壤总磷含量出

现下降趋势。

土壤总磷含量变化量呈现处理 3>处理 1>处理 2 的趋势,各土层土壤总磷含量变化量从大到小依次是:20~40>40~60 >10~20 >5~10 >0~5 cm(图 6(b))。表明:成熟期土壤中总磷的含量被吸收的很少,可能原因是芦苇在成熟期对土壤中总磷含量的需求较小,大部分磷元素均在各层中分布,土壤表层总磷含量较大,可能原因是由于芦苇在成熟期水分蒸发量较大,部分总磷含量随着土壤水分蒸发迅速积累在表层。

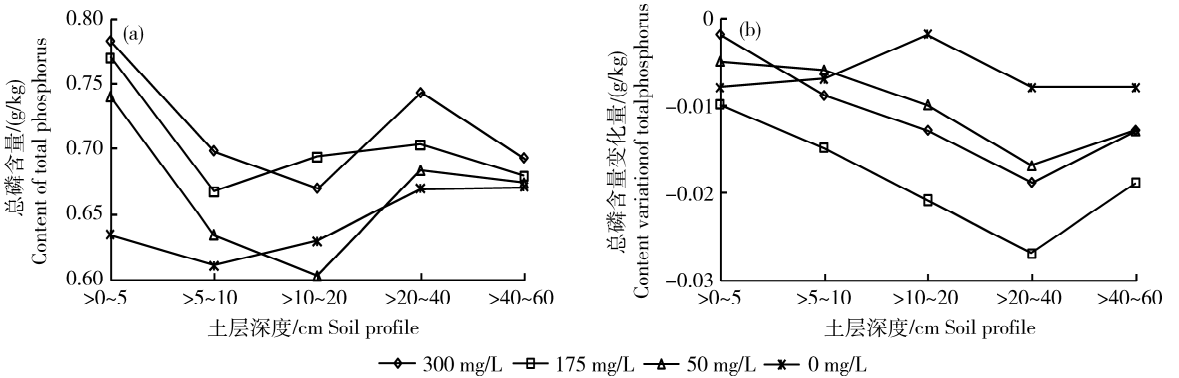


图 6 成熟期不同土层深度土壤总磷含量(a)和变化量(b)

Fig. 6 Content (a) and content's variation (b) of total phosphorus in different soil profile in the mature period

2.2 造纸废水灌溉对芦苇总磷含量的影响

不同质量浓度造纸废水灌溉条件下,灌溉组芦苇总磷含量随生长期变化趋势为成熟期>拔节期>抽穗期>展叶期>发芽期(图 7)。成熟期芦苇总磷

含量达到最大值,为 2.34 g/kg。由于成熟期时,气温不断降低,芦苇对于吸收微生物活性减弱,对有机质吸收也减弱,而废水灌溉组由于水分补给作用,使芦苇含量持续增加。灌溉组明显高于对

对照组 CK,说明造纸废水灌溉条件下使芦苇中总磷含量增加。

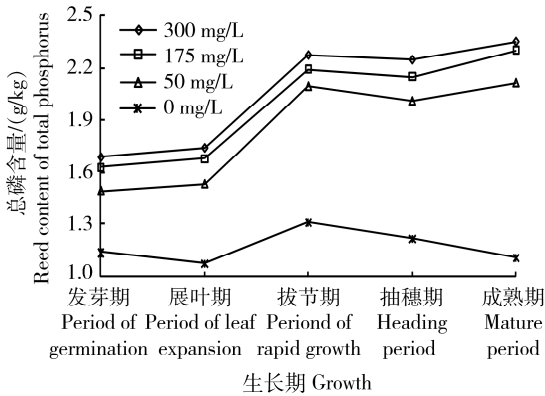


图 7 不同质量浓度造纸废水灌溉对芦苇中总磷含量的影响

Fig. 7 Effects of different concentrations of papermaking wastewater irrigation on the reeds of total phosphorus content

总磷在芦苇穗中的含量最少,在茎中的含量最多,茎、叶、穗、根中总磷含量按照大小的分布特征为:茎>叶>根>穗(图 8)。随着造纸废水灌溉质量浓度的增加,总磷含量在各个部分的含量也有所增加,变化趋势为处理 1>处理 2 >处理 3。对照组茎、叶、穗、根中总磷含量的分布特征为:茎>叶>穗>根。废水灌溉组芦苇中总磷含量均高于对照

组,说明造纸废水灌溉下,增加了芦苇体内的总磷含量。芦苇茎和叶中总磷含量较高于芦苇根和穗中的总磷含量。

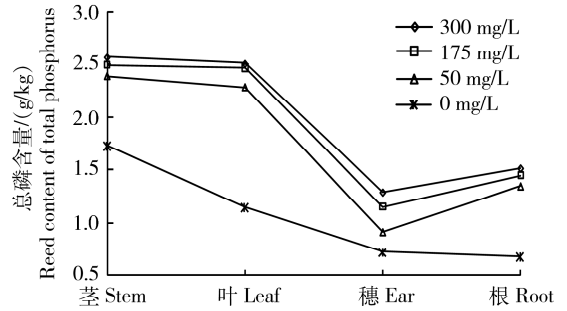


图 8 不同质量浓度造纸废水灌溉后总磷在芦苇内的分布

Fig. 8 Papermaking wastewater irrigated with different concentrations of total phosphorus distributed in the reed

2.3 湿地土壤总磷、总氮、有机质、PH 及芦苇总磷的关系

为进一步研究湿地土壤中总磷、总氮、有机质、pH 及芦苇总磷含量的关系,对土壤总磷含量进行相关分析,结果见表 2。可知,土壤总磷、总氮、有机质及芦苇总磷在 0.01 水平上呈极显著正相关关系,其中土壤总磷与总氮相关性最强。总磷与 pH 相关性不显著,这表明 pH 对该湿地磷含量影响较弱。

表 2 湿地土壤总磷、总氮、有机质、pH 及芦苇总磷的相关系数

Table 2 The correlation coefficient wetland soil total phosphorus, total nitrogen, organic matter, pH and total phosphorus reed

指标名称 Index name	总磷 TP	总氮 TN	有机质 SOM	pH	芦苇总磷 Reed TP
总磷 TP	1.000	0.453**	0.374**	0.068	0.251**
总氮 TN	0.453**	1.000	0.633**	0.002	-0.246
有机质 SOM	0.374**	0.633**	1.000	0.360	-0.190
pH	0.068	0.002	0.360	1.000	-0.205
芦苇总磷 Reed TP	0.251**	-0.246	-0.190	-0.205	1.000

注:显著性水平为 0.01。

Note: The significance level is 0.01.

3 结论与讨论

3.1 结论

采用不同灌溉方式对盐碱化芦苇湿地进行灌溉,经分析芦苇各生长期土壤中总磷含量及变化量

得出如下结论:

1)在芦苇不同生长期灌溉不同质量浓度造纸废水,土壤中总磷含量随着土层深度增加变化趋势基本相同,在 0~5 cm 土层中总磷含量最大,灌溉质量浓度为 300 mg/L 处理总磷含量最大,50 mg/L 处

理总磷含量最小,在10~20 cm土层中总磷含量最少。随着土层的加深,总磷积累量减少。

2) 废水灌溉组土壤总磷含量比灌溉前有所增加,且均高于对照组,不同灌溉组之间土壤总磷含量差异比较显著,至芦苇成熟期末,废水灌溉组土壤总磷含量在土层剖面分布规律 $0\sim 5 > 5\sim 10 > 20\sim 40 > 40\sim 60 > 10\sim 20$ cm,土壤中总磷含量在表层产生了积累。

3) 发芽期至抽穗期灌溉不同质量浓度的造纸废水后,土壤中总磷含量变化量以质量浓度300 mg/L处理的变化量最大,175 mg/L处理变化量最小。造纸废水灌溉能增加土壤中总磷含量的积累,质量浓度为300 mg/L处理的总磷含量增加最大。

4) 不同造纸废水灌溉条件下,芦苇中总磷含量随生长期变化趋势为成熟期>拔节期>抽穗期>展叶期>发芽期。造纸废水灌溉后,灌溉组芦苇中总磷含量持续增加,总体上大于对照组CK。总磷在芦苇内含量的分布特征为茎>叶>根>穗,茎是芦苇中总磷主要的储存部位。

5) 土壤中总磷、总氮、有机质及芦苇总磷在0.01水平上呈极显著正相关关系,总磷与pH相关性不显著。

3.2 讨论

土壤剖面中总磷含量动态变化受多种因素影响^[20]。土壤总磷的积累不仅与灌溉质量浓度有关,还与植物吸收总磷有关,当超过植物本身的需求时,在湿地中长期大量灌溉废水会导致土壤中总磷含量的积累。本试验研究结论与马欣等^[5]、夏宝江等^[10]的研究结果一致。造纸废水有助于改善土壤理化性质,本试验结果表明造纸废水灌溉有助于总磷在土壤中的积累,从而有利于湿地芦苇对总磷含量的吸收。从芦苇的不同生育期分析,在芦苇的发芽期和成熟期灌溉造纸废水对土壤总磷含量的积累效应最弱,相反拔节期和抽穗期对土壤总磷含量积累效应最明显。灌溉不同质量浓度的造纸废水,质量浓度越大,总磷含量在芦苇体内积累的越多。从灌溉不同废水质量浓度分析,废水质量浓度越大,总磷在土壤中的积累量越多;从土层深度分析,总磷含量在土壤表层积累量最大,随着土层的加深,总磷含量逐渐减小。造纸废水灌溉促进土壤和芦苇对总磷的大量吸收,原因是灌溉废水后土壤中总氮和有机质含量的增多。土壤中总氮和有机质含量增加,改善土壤性状,提高土壤的肥力。土壤总磷与pH负相关,说

明pH的升高有利于土壤总磷的释放,低pH可以导致土壤对总磷的吸附,这与尹大强^[21]在pH对沉积物释放影响的研究中得到的结论一致。总之,总磷含量变化在曲线表达上没有很好的规律可循,长期造纸废水灌溉对芦苇湿地土壤理化性质和芦苇的生长状况有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 王西琴,李力. 辽河三角洲湿地退化及其保护对策[J]. 生态环境,2006,15(3):650-653
Wang X Q, Li L. Wetlands degradation and protection countermeasures[J]. *Environment*, 2006, 15(3): 650-653 (in Chinese)
- [2] 郭成久,周欣,苏芳莉,王铁良,王娟. 双台河口湿地芦苇对造纸废水中重金属净化效果研究[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(2):206-210
Guo C J, Zou X, Su F L, Wang T L, Wang J. Shuang tai he kou wetland reeds of papermaking wastewater purification effect of heavy metals [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(2): 206-210 (in Chinese)
- [3] 史文娟,沈冰,汪志荣,王文焰. 层状土壤中砂层层位对潜水蒸发的影响[J]. 干旱区地理,2006,29(2):282-286
Shi W J, Shen B, Wang Z R, Wang W Y. Soil layers of sand on the phreatic evaporation bit[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(2): 282-286 (in Chinese)
- [4] Jalali M, Merikhpour H, Kaledhonkar M J, Vanderzee S. E. A. M. Effects of wastewater irrigation on soils sodality and nutrient leaching in calcareous soils [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 25(2): 143-153
- [5] 马欣,夏孟娟,陆兆华,裴定宇,刘志梅,苗颖. 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[J]. 生态学报,2010,30(11):3001-3009
Ma X, Xia M J, Lu Z H, Pei D Y, Liu Z M, Miao Y. Papermaking Wastewater Irrigation in Yellow River Delta and degraded coastal wetlands Saline soil chemical properties[J]. *Ecological Sinica*, 2010, 30(11): 3001-3009 (in Chinese)
- [6] Miyamoto S. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1-2): 28-38
- [7] Rosenquist H, Dawson M. Economics of using wastewater irrigation of willow in Northern Ireland [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 29(2): 83-92
- [8] 于妍,夏梦娟,裴定宇,陆兆华. 废水灌溉下有机物料对重度盐渍土养分及芦苇生长的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(4):448-455
Yu Y, Xia M J, Pei D Y, Lu Z H. Wastewater irrigation of organic materials under the influence of severe saline soil nutrient and reed growth[J]. *China Eco-Agriculture*, 2013, 21

- (4):448-455 (in Chinese)
- [9] 董丽洁,陆兆华,贾琼,裴定宇,佟海荣,李伟,朱金方,夏孟婧. 造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2010,30(24):6821-6827
Dong L J, Lu Z H, Jia Q, Pei D Y, Tong H R, Li W, Zhu J F, Xia M J. Effect of papermaking wastewater irrigation on the Yellow River Delta saline soil enzyme activities[J]. *Ecological Sinica*, 2010, 30(24):6821-6827 (in Chinese)
- [10] 夏江宝,谢文军,孙景宽,刘京涛,刘擎,陆兆华. 造纸废水灌溉对芦苇生长及其土壤改良效应[J]. 水土保持学报,2011,25(1):110-113,118
Xia J B, Xie W J, Su J K, Liu J T, Liu Q, Lu Z H. Papermaking wastewater irrigation on reed growth and soil improvement [J]. *Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):110-113, 118 (in Chinese)
- [11] 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
Li J L, Tian J Y, Li X P. Effect of papermaking wastewater irrigation on microbial reed wetland[J]. *Marine Sciences*, 2009 (4):163-170 (in Chinese)
- [12] 刘擎,夏江宝,贾岱,谢文军,孙景宽,陆兆华. 造纸废水灌溉对轻度盐碱芦苇湿地理化性状的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(4):258-261,267
Liu Q, Xia J B, Jia D, Xie W J, Su J K, Lu Z H. Effect of papermaking wastewater irrigation on light saline reed wetland geo-traits[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2011, 18(4):258-261,267 (in Chinese)
- [13] 芦宝良,陈克龙,曹生奎,杨龙,陈生云,马进. 青海湖典型湿地土壤重金属空间分布特征[J]. 水土保持研究,2012,19(3):190-194
Lu B L, Chen K L, Cao S K, Yang L, Chen S Y, Ma J. Qinghai lake typical wetland soil heavy metal spatial distribution[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2012, 19(3):190-194 (in Chinese)
- [14] 刘双,李敏,张晶,曹琪,魏祥甲,刘玉金,张立强,阎育梅. 野鸭湖湿地土壤总磷分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(4):4-8
Liu S, Li M, Zhang J, Cao Q, Wei Y J, Liu Y J, Zhang L Q, Yan Y M. Distribution of soil TP in the wetlands and its influencing factors [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 35(4):4-8 (in Chinese)
- [15] 肖蓉,白军红,高海峰,邓伟,崔保山. 封闭性和开放性沼泽湿地土壤全磷的季节变化特征[J]. 草业学报,2010,19(3):88-93
Xiao R, Bai J H, Gao H F, Deng W, Cui B S. Closed and open marsh soil seasonal variation of total phosphorus [J]. *Grass industry*, 2010, 19(3):88-93 (in Chinese)
- [16] Mitsch W J, Gosselink J G. *Wetlands* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1986
- [17] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication [J]. *Agricultural Environment*, 1998, (27):251-257
- [18] 侯培强,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[J]. 兰州铁道学院学报,2008,27(1):42-45
Hou P Q, Ren J, Tao L, Chen X M, Fu X Y. Effect of papermaking wastewater irrigation on soil nutrients ecological forest desert [J]. *Lanzhou Railway Institute*, 2008, 27(1):42-45 (in Chinese)
- [19] 周芳,苏芳莉,李海福. 灌溉造纸废水对模拟芦苇湿地土壤中镁离子含量的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):240-248
Zhou F, Su F L, Li H F. Effect of irrigation papermaking wastewater simulated reed wetland soil magnesium ion content [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6):240-248 (in Chinese)
- [20] 罗先香,敦萌,闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报,2011,25(5):154-160
Luo X X, Guo M, Yan Q. Yellow River estuary wetland soil phosphorus dynamic distribution characteristics and influencing factors [J]. *Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5):154-160 (in Chinese)
- [21] 尹大强,覃秋荣,阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学,1994(3):240-244
Yin D Q, Tan Q R, Yan H. Influence of environmental factors on release of phosphorus from sediments of Wuli lake [J]. *Lake Sciences*, 1994(3):240-244 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春