

三种类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较^①

王岩, 王建国*, 李伟, 薄录吉, 杨林章

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为了了解太湖地区不同类型农田排水沟渠对 N、P 拦截效果的影响, 分别在野外构建了 3 种类型的农田排水沟渠, 即生态沟渠、混凝土沟渠和土质沟渠。研究了不同进水 N、P 浓度、不同水力停留时间和不同进水流速条件下, 3 种类型沟渠的 N、P 拦截效果。结果表明: 在水力停留时间分别为 24 h 和 48 h 静态试验以及在固定进水流速的动态试验中, 沟渠对不同进水 N、P 浓度的 N、P 去除率大小顺序是: 生态沟渠、土质沟渠和混凝土沟渠, 其中, 生态沟渠明显优于其他沟渠。在固定进水浓度的条件下, 沟渠在不同水力停留时间下的 N、P 去除率大小顺序为: 生态沟渠、土质沟渠和混凝土沟渠, 其中, 生态沟渠明显好于其他沟渠。在高、低两种进水流速和固定进水浓度条件下, 生态沟渠在低进水流速下的 N、P 去除率明显优于其他沟渠。在不同进水浓度条件下, 生态沟渠最佳水力停留时间为 48 h。

关键词: 生态沟渠; 进水浓度; 水力停留时间

中图分类号: X17

在太湖地区, 随着经济的快速发展, 农田化肥农药不合理使用的情况日益严重, 大量流失的营养元素随地表径流进入湖泊河流, 引起极为严重的富营养化现象^[1-4]。许多研究结果表明农业非点源污染, 尤其是自农田的地表径流对水体的污染贡献最大^[5-7]。而关于太湖流域平原河网地区农田 N、P 流失浓度规律的研究则表明农沟、菜地、稻田的 N 流失量远超过其他土地利用类型^[8]。可见, 农业非点源污染, 尤其是来自农田的 N、P 流失是导致太湖及周边河网水体富营养化的重要原因。

目前控制农田 N、P 非点源污染的措施主要由两方面入手: 一是减少源头排放量, 即减少化肥施用量; 二是减少污水入湖量和入湖浓度, 即减少农田排水量和排水浓度, 而减少农田排水量和排水中 N、P 浓度的主要途径之一就是充分利用和发挥现有农田排水沟渠的功能。目前太湖地区传统农田排水沟渠的类型主要有两种: 土质沟渠和混凝土沟渠。前者存在的主要问题是容易产生水土流失和丛生杂草, 两者都对受纳水体产生污染; 后者存在的主要问题, 一是沟渠中水流较快, 难以较完全的沉降排水中的泥沙; 二是缺少植物和微生物, 不能吸收吸附和降解排水中的 N、P。

为了克服以上两种沟渠的缺点, 利用其各自的优点, 引入生态沟渠类型, 并对 3 种类型的沟渠进行 N、P 拦截效果比较研究, 以验证生态沟渠在拦截农田排水中 N、P 的优势, 进而为太湖地区有效控制农田 N、P 非点源污染提供技术支撑。

1 材料与方法:

1.1 试验设计

试验地设在江苏省宜兴市丁蜀镇涓涓村农田中 (31°17.295N, 119°53.898E), 3 种类型农田排水沟渠是按照当地普遍存在的农田排水沟渠的尺寸设计的, 即沟渠横截面为梯形, 上宽 1 m, 下宽 0.5 m, 深 0.94 m。其中生态沟渠的两壁和底部采用其上分布有许多长方形孔洞的混凝土板材硬化, 混凝土沟渠的两壁和底部均采用混凝土板材硬化, 土质沟渠的两壁和底部均为土质。3 种类型沟渠长度均为 30 m。生态沟渠的沟底种植水芹, 沟壁种植黑麦草、乌塌菜和青菜; 混凝土沟渠和土质沟渠的沟壁和沟底均未人为布置植物。

3 种类型沟渠均设两种试验类型: 静态试验和动态试验。静态试验: 配置不同 N、P 浓度的进水 (N

^①基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAD17B03)、国家自然科学基金面上项目 (40771119)、江苏省社会发展基金项目 (BS2006093)、农业科技成果转化资金项目 (2007GB24910479) 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助。

* 通讯作者 (jgwang@issas.ac.cn)

作者简介: 王岩 (1984—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事面源污染治理技术研究。E-mail: wangy@issas.ac.cn

浓度：4.02 ~ 40.5 mg/L；P 浓度：0.11 ~ 1.24 mg/L），4 天一周期，分别于停留时间为 HRT = 0、6、24、48、72 h 时采集水样，每个浓度重复 3 次。动态试验：在水体流动条件下，选择高低两个流速采集水样，每种流速重复 3 次。沟渠进水 N、P 浓度仿照农田排水中的 N、P 浓度范围进行配制。

1.2 样品采集与测定

静态试验的采样方法：在每条沟渠的前、中、后 3 处分别设置水样采样点，结果取平均值。

动态试验的采样方法：在水体流动条件下，同时在沟头和沟尾采集水样。

试验结束后对沟底和沟壁的植物进行取样并统计生物量。

水样主要分析项目为总N、总P，取样及常规处理

见参考文献[9]。分析仪器为荷兰 Skalar 公司 SA-4000 型N、P流动分析仪；植株的主要分析项目为 N、P 含量，总N的测定采用开氏定氮法，总P的测定采用钼锑抗比色法测定^[10]。

文中提到的 N、P 去除率，为各条件下采集的水样浓度与初始进水浓度的比值。

2 结果与讨论

2.1 进水浓度对 3 种沟渠氮磷净化效果的影响

在静态试验中，当水力停留时间为 24 h 和 48 h 时，3 种沟渠在不同进水浓度下的 N、P 去除率见图 1。从图 1 中可以看出，进水浓度和水力停留时间对 3 种沟渠 N、P 去除率有不同程度的影响。

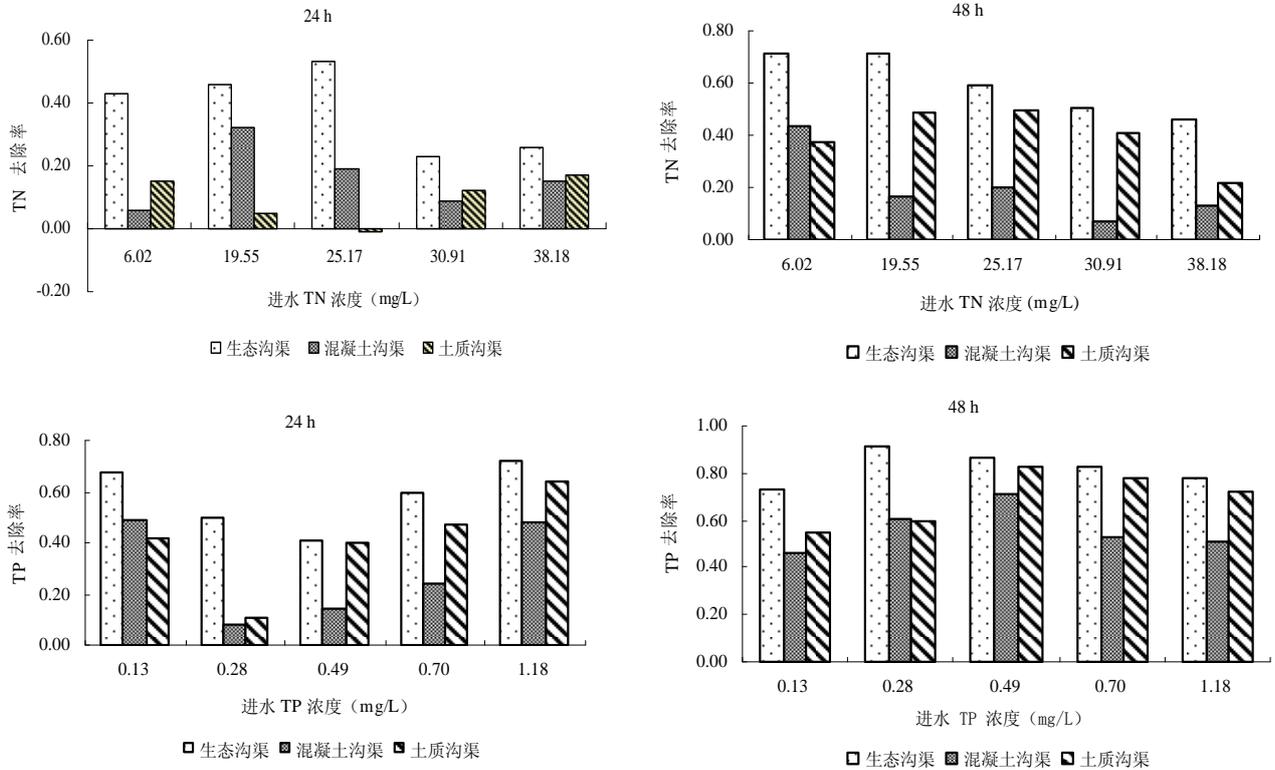


图 1 静态试验中 TN、TP 的去除率与进水浓度的关系

Fig. 1 Relationship between removal efficiencies of TN, TP and run-off concentration in static test

2.1.1 进水浓度对 3 种沟渠 N 去除率的影响 在水力停留时间为 24 h 的条件下，生态沟渠在前 3 种浓度下的 TN 去除率分别为：0.43、0.46 和 0.53，分别是同浓度下混凝土沟渠的 10.8、1.4 和 2.8 倍，土质沟渠的 2.9、9.2 和 54 倍；在后两种浓度下，生态沟渠对 TN 的去除率虽然下降了一半，但依然高于混凝土沟渠和土质沟渠。在水力停留时间为 48 h 的条件下，生

态沟渠对 TN 的去除率一直保持最高，但随着进水 TN 浓度的增加，其对 TN 的去除率出现降低的趋势；混凝土沟渠除第一个浓度外，对 TN 的净化效果不足生态沟渠的三分之一，是净化效果最差的沟渠；土质沟渠的 TN 去除率则表现为随进水浓度的增加先升高再降低的变化趋势。

上述结果，可能由下列原因所致：对于生态沟渠

而言, ①植物的根将生成的氧传输到水中, 扩散到周围缺氧的底泥中, 与根基分泌物(微生物 C 源)一起促进硝化细菌生长, 促进了水体中 N 的吸收和转化; ②水生植物可以直接从水体和自身拦截的颗粒物中吸收 N, 同化为自身所需要的物质; ③生态沟渠中的植物还可以起到减缓水流、延长水力停留时间、促进植物吸收的作用, 这使得生态沟渠成为对氮的净化效果最好的沟渠。但是, 由于生态沟渠中的植物量是有限的, 所以其去除 N 的总量也存在一个阈值, 随着进水浓度的升高, 进入沟渠的 N 总量超过了这个阈值, 生态沟渠对 N 的去除率就相应的下降, 其与混凝土沟渠和土质沟渠的净化差距也会随之减小。对于混凝土沟渠而论, 因为没有人为种植水生植物, 主要靠沉积物和板材的吸附作用去除水体中的 N, 当吸附达到饱和后, 沟渠对 N 的去除率就会降低, 所以混凝土沟渠的处理效果除第一试验内对 TN 的去除率较高外, 一直是处理效果最差的沟渠。对于土质沟渠来说, 因为沟渠中的土壤颗粒可以吸附水体中的 N, 而且沟壁上自发的生长了少量植物, 所以其净化效果要好于混凝土沟渠; 由于土质沟渠的生物量小于生态沟渠, 所以其去除率低于生态沟渠。

相关性分析表明, 48 h 的 TN 去除率与进水 TN 浓度呈显著负相关, 相关系数为 -0.904^* , 即当停留时间为 48 h 时, 进水 TN 浓度成为制约 TN 净化效果的因素。

2.1.2 进水浓度对 3 种沟渠 P 去除率的影响 在水力停留时间为 24 h 的条件下, 生态沟渠在前两种浓度下对 TP 的去除率(0.68 和 0.50)明显好于土质沟渠(0.42 和 0.11), 但随着进水浓度的增加, 生态沟渠的去除率略有降低, 与土质沟渠的处理效果差距稍有减小。混凝土沟渠除第一个浓度外, 去除率一直是最差的。在水力停留时间为 48 h 的条件下, 生态沟渠对 TP 去除效果比较稳定且保持在较高的水平(0.73 ~ 0.91), 土质沟渠次之, 混凝土沟渠最差。这与徐红灯等^[11-12]的研究结果一致。引致上述结果的主要原因与对 N 的去除类似, 也是通过沟渠中植物的吸收吸附和拦截沉降泥沙作用达到去除 P 元素的目的。

相关性分析表明, 两个停留时间下, 进水 TP 浓度与生态沟渠的 TP 去除率相关性不显著, 因此, 在试验设计的浓度范围内进水 P 浓度不是制约其净化效果的主要因素。

上述试验结果经 T 检验, 24 h 时生态沟渠对 TN 的去除相对于混凝土沟渠和土质沟渠的显著性概率分别达到 0.017 和 0.03, 差异显著; 对 TP 的去

除相对于土质沟渠的显著性为 0.002, 差异极显著; 48 h 时生态沟渠对 TN 的去除与混凝土沟渠的显著性为 0.001, 差异极显著, 与土质沟渠的显著性概率达到 0.013, 呈显著性差异; 其对 TP 的去除与混凝土沟渠的显著性为 0.001, 差异极显著。这说明在以上进水浓度下, 生态沟渠对农田排水的净化效果显著优于混凝土沟渠和土质沟渠。

在动态试验中, 固定进水流速, 两种进水浓度下 3 种沟渠对 TN、TP 的去除率见图 2。从图 2 中可以看出, 进水浓度对 3 种沟渠 N、P 去除率有不同程度的影响。

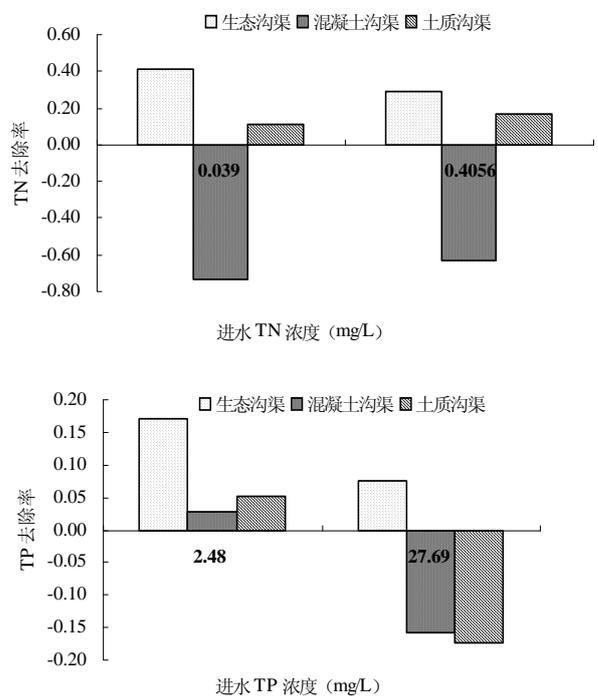


图 2 动态试验中 TN、TP 的去除率与进水浓度的关系

Fig. 2 Relationship between removal efficiencies of TN, TP and run-off concentration in dynamic test

2.2 水力停留时间 (HRT) 对 3 种沟渠氮磷净化效果的影响

当进水 TN、TP 浓度分别为 19.55 mg/L 和 0.49 mg/L 时, 3 种沟渠对 N、P 的去除率与 HRT 的关系见图 3。从图 3 可以看出, HRT 对 3 种沟渠 N、P 去除率有不同程度的影响。

2.2.1 HRT 对 3 种沟渠 N 去除率的影响 ①混凝土沟渠: 随着 HRT 的增加, 对 N 的去除率是较快速地增加, 并于 24 h 达到最大值; 之后又较快速地下降, 并于 48 h 达到最低值; 其后保持最低值不变。主要原因是, 该沟渠对 TN 的去除是一个吸附—解吸过程。一开始由于水体中 N 的浓度较高, 沟渠壁以吸

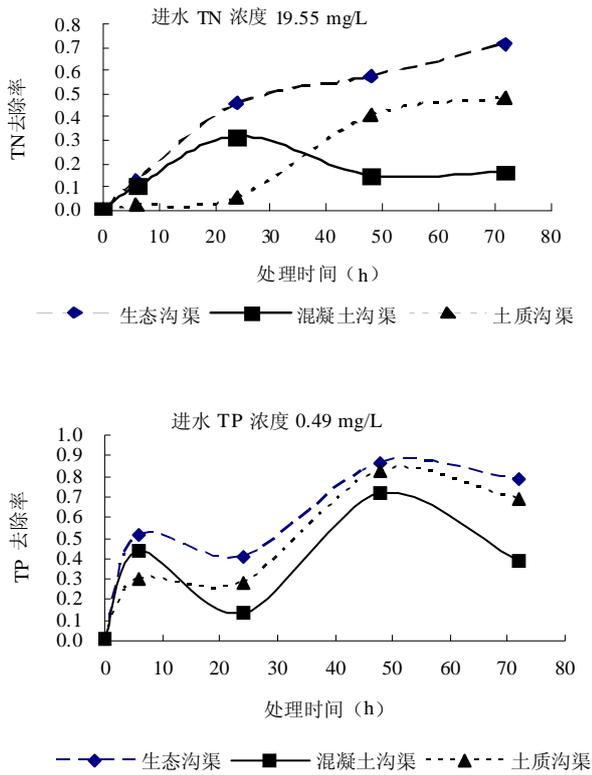


图 3 不同 HRT 下对 TN、TP 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiencies of TN and TP in different HRTs

附为主，表现为 N 去除率的升高；而随着水体中 N 浓度的降低和沟渠壁对 N 富集度的增加，沟渠壁以解吸为主，表现为 N 去除率的下降；当沟渠壁对 N 的吸附与解吸达到平衡时，就表现为 N 去除率不变。②土质沟渠：随着 HRT 的增加，对 N 的去除率在 0~24 h 内很低，之后便较快速地增加，并于 48 h 达到最大值后保持不变。主要原因是，该沟渠对 N 的去除以植物吸收为主。一开始水体中的 N 首先被植物吸附，表现为较低的去为主，表除率；但随着 HRT 的增加，植

物开始吸收 N，表现为 N 去除率的逐渐提高；由于沟渠中的植物数量是有限的，当植物对 N 的吸收吸附饱和后，就表现为 N 去除率不变。③生态沟渠：对比图中 3 种沟渠 N 去除率曲线可以看出，生态沟渠曲线可由混凝土和土质沟渠两条曲线叠加而成，即生态沟渠 N 去除率基本上是混凝土和土质沟渠去除率之和。这主要是生态沟渠集混凝土和土质沟渠的优点于一身所引致的。当 HRT 较短时，沟渠壁对 N 的吸附在 N 去除方面占主导地位；当 HRT 较长时，沟渠中的植物对 N 的吸收在 N 去除方面占主导地位。

2.2.2 HRT 对 3 种沟渠 P 去除率的影响 随着 HRT 的增加，3 种沟渠对 P 的去除率共同表现为：在 6 h 时出现第一个峰值，在 24 h 时出现谷值，在 48 h 时出现第二个峰值。除第一个峰值土质沟渠最小外，其余谷值和峰值均表现为生态沟渠最大，土质沟渠次之，混凝土沟渠最小。这可能是由混凝土沟壁、沟中植物对 P 的吸附—解吸以及沟中植物吸收所引致的。随着 HRT 的增加，在 6 h 时，混凝土沟壁的吸附量大于植物，而混凝土沟壁和植物的联合吸附作用又大于纯混凝土沟壁；在 24 h 时，混凝土沟壁的解吸量大于植物；在 24~48 h 时，植物的吸收吸附量大于混凝土沟壁。

从上述结果中可以看出，生态沟渠对 N、P 的去除主要集中在进水后的前两天。在此期间水体中 N、P 浓度迅速下降并达到一个较稳定的数值，之后不再随 HRT 的延长有明显的变化。这同 Tao WD 等人^[13]的研究结果一致。

2.3 进水流速对 3 种沟渠氮磷净化效果的影响

进水流速为 0.23 m³/h 和 0.48 m³/h 时，3 种沟渠在不同进水流速下的 TN、TP 去除率列于表 1。从表 1 中可以看出，进水流速对 3 种沟渠 N、P 去除率存在不同程度的影响。

表 1 不同流速下的 TN、TP 的去除率和 HRT 值

Table 1 Removal efficiencies of TN, TP and HRT under different flow rates

沟渠	低流速			高流速		
	TN 去除率	TP 去除率	HRT (min)	TN 去除率	TP 去除率	HRT (min)
生态沟渠	0.20	0.36	100	0.05	0.26	50
混凝土沟渠	0.05	-1.24	45	-0.02	-0.25	25
土质沟渠	-0.07	0.16	55	0.02	0.21	30

2.3.1 进水流速对 3 种沟渠 N 去除率的影响 在低进水流速条件下，生态沟渠对 N 的去除率为 20%，而

混凝土和土质沟渠则没有明显的净化作用。主要原因是生态沟渠的 HRT (100 min) 远远大于混凝土沟渠

(45 min) 和土质沟渠 (55 min)。在高进水流速条件下, 3 种沟渠均未表现出明显的净化作用, 主要是沟渠的 HRT 太短的缘故。综观高、低进水流速条件下 3 种沟渠的 HRT 可知, 当 $HRT < 50 \text{ min}$ 时, 均不存在明显的净化作用。

2.3.2 进水流速对 3 种沟渠 P 去除率的影响 在高、低两种进水流速条件下, 生态沟渠对 P 的去除率均明显好于混凝土和土质沟渠, 主要原因是生态沟渠的 HRT 远远大于混凝土和土质沟渠。生态沟渠在两种进水流速条件下 P 去除率存在的差异, 主要原因是 HRT 的不同。土质沟渠在两种进水流速条件下既有一定的净化作用又存在差异, 可能是进水时水流扰动底泥产生悬浮颗粒而吸附水体中 P 所引致的; 进水流速越快, 产生的悬浮颗粒越多, 吸附的 P 也越多。混凝土沟渠在高、低两种进水流速条件下对 P 的去除率出现负值, 可能是底泥中沉积了较多的颗粒态 P, 进水流速的扰动促进了颗粒态 P 的释放; 而在高、低两种进水流速条件下对 P 的去除率所存在的差异, 可能原因是由于底泥中沉积的颗粒态 P 数量有限, 在做完低进水流速试验后, 所剩数量大大减少。

3 结论

(1) 生态沟渠对农田排水中 N、P 的拦截效果明显优于传统的混凝土沟渠和土质沟渠。

(2) 进水浓度和水力停留时间 (HRT) 影响着生态沟渠对农田排水中 N、P 的拦截效果。在各种进水浓度下, 48 h 时 HRT 能实现拦截 N、P 的最佳效果。

(3) 沟渠中的植物在农田排水 N、P 拦截中起着关键作用。

参考文献:

- [1] 高超, 朱建国, 窦贻俭. 农业非点源污染对太湖水质的影响: 发展态势与研究重点. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3): 260-263
- [2] 许朋柱, 秦伯强. 太湖湖滨带生态系统退化原因以及恢复与重建设想. 水资源保护, 2002(3): 31-36
- [3] 朱兴东. 太湖流域河流污染及修复维护对策. 环境保护, 2006(1): 43-44
- [4] 赵丰, 黄民生, 戴兴春. 当前水环境污染现状分析与生态修复技术初探. 上海化工, 2008, 33(7): 27-30
- [5] 夏立忠, 杨林章. 太湖流域非点源污染研究与控制. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 45-49
- [6] 孙昊宇. 基于营养物清算系统的我国农业氮磷流失管理思考. 科技信息 (学术版), 2006 (1): 3-4
- [7] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 太湖流域水环境综合整治与生态修复. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 76-79
- [8] 曾远, 张永春, 范学平. 太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析. 水资源保护, 2007, 23(1): 25-27
- [9] 国家环境保护总局 (水和废水监测分析方法) 编委会. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-246
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 农业科技出版社, 2002: 147-149
- [11] 张志勇, 冯明雷, 杨林章. 浮床植物净化生活污水中 N、P 的效果及 N_2O 的排放. 生态学报, 2007, 27(10): 4333-4341
- [12] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 蔡洋. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84-88
- [13] Tao WD, Hall ken J, Sheldon J B Duff. Performance evaluation and effects of hydraulic retention time and mass loading rate on treatment of wood waste leachate in surface-flow constructed wetland. Ecological Engineering, 2006, 26: 252-265

Comparison on Removal of Nitrogen and Phosphorus form Hibernar Farmland Drainage by Three Kinds of Ditches

WANG Yan, WANG Jian-guo, LI Wei, BO Lu-ji, YANG Lin-zhang

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: We constructed 3 types of agricultural drains in The Taihu Lake basin (TLB), including an ecological ditch, a cement ditch and a soil ditch, in order to compare their differences in removal of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in a series of influent concentration and hydraulic retention time (HRT), the results showed that: in different conditions of HRT, influent flow or influent concentration, the removal efficiency of TN and TP of ecological ditch was significantly higher than other two ditches, while soil ditch was higher than cement ditch. In the static experiments the best of ecological ditch HRT was 48h.

Key words: Ecological ditch system, Influent concentration, Hydraulic retention time