

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110114. 1730. 004

# 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除定量化

吴建强

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要:** 利用构建的东风港缓冲带现场试验基地和设计的径流流量测定装置, 模拟上海地区农业面源污染物浓度和典型单次降雨历时及降雨量, 对不同坡度缓冲带滞缓径流和农田氮磷污染物去除能力开展定量化试验研究。结果表明: 相同植被缓冲带, 坡度越小, 其滞缓径流和土壤水力渗透的能力越强, 19 m长的2%坡度缓冲带径流初始出水时间比5%坡度缓冲带延长了7.3 min, 两者的渗流水量比值达到1.74; 不同坡度缓冲带渗流氮磷污染物去除量显著高于径流, 2%、3%、4%和5%坡度缓冲带对于氮磷污染物的渗流去除量与径流去除量的比值分别为2.32、2.15、1.82和1.64; 坡度的变化对缓冲带净化面源氮磷污染物效果的影响显著, 坡度越小, 缓冲带渗流水量越大, 其氮磷污染物的总去除率和单位面积去除负荷也越高, 2%坡度缓冲带对氮磷污染的总去除率和单位面积污染去除负荷分别是5%坡度的1.56倍和1.66倍, 2%坡度缓冲带对TN、NH<sub>3</sub>-N、TP的单位面积去除负荷均最高, 分别达到0.661 g/m<sup>2</sup>、0.672 g/m<sup>2</sup>和0.044 g/m<sup>2</sup>。

**关键词:** 缓冲带; 坡度; 滞缓径流; 污染物去除; 定量化

**中图分类号:** X143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2011)01-0112-06

国内外研究实践表明, 河流缓冲带(Buffer strips)是截留陆域面源污染物、改善河道水质的有效手段<sup>[1-3]</sup>。如Hill等<sup>[4]</sup>研究发现, 造成河流和湖泊富营养化的一个重要原因是河岸带生态系统退化直接导致了其蓄藏和拦截过滤功能的丧失; Peterjohn等<sup>[5]</sup>认为, 河流滨岸带能有效降低径流速度, 防止水流侵蚀, 促进泥沙沉积, 并滞留、降解其中大量的氮磷营养物质。近年来, 国内也有一些学者开始关注河岸缓冲带控制面源污染的研究, 如杨胜天等<sup>[6]</sup>、郭怀成等<sup>[7]</sup>研究得出了河岸带退化、土地利用变化与河流水质之间的关系, 但未进行深入的缓冲带改善水质试验研究; 潘成忠等<sup>[8]</sup>通过室内模拟实验研究得出不同坡度草地对径流泥沙的拦截率达到19.5%~43.6%, 坡度与草地径流污染物拦截效应成反势; 董凤丽等<sup>[9]</sup>在较小尺度上研究了植被缓冲带对农业面源氮磷污染物的净化效果。影响缓冲带滞缓径流、截留面源污染物的因素很多, 其中一个重要的变量就是缓冲带的坡度结构, 坡度越小, 地表径流流速越低, 流经缓冲带的时间越长, 污染物截留和降解效率也越高<sup>[10-11]</sup>。但是, 坡度的变化对于缓冲带滞缓径流速度、提高土壤水力渗透的实际能力, 以及由此而影响的缓冲带对面源氮磷污染物的实际去除量尚不明确, 有必要对相关问题进行探索和研究。

本文选择上海市青浦区东风港建立缓冲带试验基地, 利用自行设计的径流流量测定装置, 开展缓冲带控制农田径流氮磷污染现场试验研究, 旨在摸清不同坡度缓冲带滞缓径流、提高土壤水力渗透的实际能力, 并依此确定不同坡度缓冲带径流、渗流对面源氮磷污染物质量的去除差异, 为缓冲带控制面源污染技术在国内的研究和应用提供技术支撑。

收稿日期: 2010-03-18; 网络出版时间: 2011-01-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110114.1730.004.html>

基金项目: 上海市科学技术委员会重大基础研究资助项目(08JC1417600)

作者简介: 吴建强(1977-), 男, 江苏宜兴人, 工程师, 硕士, 主要从事农业面源污染防治和生态修复方面的研究。

E-mail: wujq@saes.sh.cn

# 1 材料与方 法

## 1.1 供试水样

根据上海地区农业面源污染特征<sup>[12]</sup>, 模拟其氮、磷等污染物质的排放负荷, 采用碳酸氢铵、过磷酸钙和泥土颗粒, 人工配置供试农田径流水样, 其主要氮磷污染物浓度如表1所示。

表1 供试水样主要污染物浓度

Table 1 Main pollutant concentrations of tested water

污染因子	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	SS
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	13.52 ± 0.39	11.94 ± 0.68	0.93 ± 0.04	390.38 ± 30.01

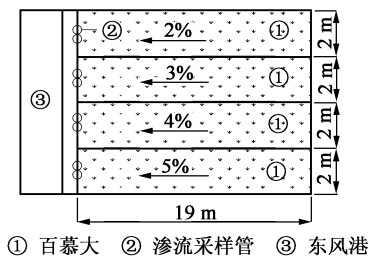
## 1.2 试验缓冲带

选择上海市青浦区镇级河道东风港一侧坡岸进行适当改造, 构建缓冲带现场试验基地(121°23'E, 31°25'N), 全年无霜期230 d, 年均降雨量1104.4 mm, 降雨天数130 d左右, 主要集中在5~10月的汛期, 土壤类型为青紫泥和沟干泥, 土质属粘壤土, 质地略显粘重。

在试验基地构建2%、3%、4%和5% 4种坡度缓冲带, 其上种植百慕大(*Cynodon dactylon*)草本植被, 每个条带长19 m, 宽2 m, 每两个条带之间用防渗薄膜隔开, 防止相互干扰。缓冲带末端设置径流分离器用于采集径流水; 预埋直径100 mm, 深80 cm的U-PVC管, 用于采集渗流水, 具体如图1所示。

## 1.3 径流流量计量装置

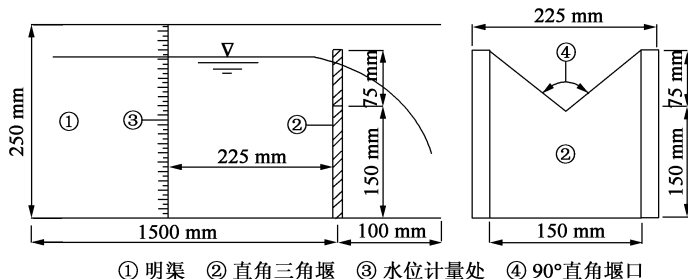
根据水力学原理、试验水量、试验带尺寸等, 设计制作径流流量直角三角形薄壁堰计量装置, 装置材料采用薄型钢板, 分为明渠和直角三角堰两部分, 装置如图2所示。径流水流经试验带末端, 经收集进入明渠, 再通过三角堰流出。



① 百慕大 ② 渗流采样管 ③ 东风港

图1 缓冲带试验条带示意图

Fig. 1 Scheme of buffer strips



① 明渠 ② 直角三角堰 ③ 水位计量处 ④ 90°直角堰口

图2 直角三角堰装置示意图

Fig. 2 Scheme of right triangle weir device

## 1.4 试验方法

(1) 三角堰测定径流量 模拟上海地区5~10月份典型单次降雨的产汇流过程和雨量开展试验研究。降雨量和降雨历时取值为40 mm和60 min, 结合汇水面积及试验带面积计算汇水量为4 m<sup>3</sup>。人工配置的径流水通过配水池流经试验带, 于末端收集进入三角堰流量计量装置的明渠, 水位在明渠中不断抬升, 最后从三角堰堰口流出。从配水池出水开始计时, 记录三角堰出水时间, 并在三角堰出水后2 min在明渠水位计量处记录第一次水位值, 以后每隔2 min记录一次, 直至径流结束。根据记录水位值和直角三角堰流量计算公式( $Q = 1.4H^{5/2}$ ,  $Q$ 为径流量,  $H$ 为水位值)计算得出单次降雨流经试验带的径流量。忽略短时间内蒸发、植物吸收等作用, 汇水量减去计算所得径流量即为试验带渗流量。

(2) 氮磷污染物去除定量化 模拟上海地区农业面源污染和降雨径流特征, 从东风港抽水至配水池, 人工配置径流水样, 经试验带处理后回到东风港, 试验工艺流程如图3所示。试验期为2008年6~10月, 每月1次, 共5次。于各试验带末端三角堰堰口和预埋的U-PVC管中分别采集径流和渗流水样各500 mL, 采样后即刻带回实验室分析。检测因子为氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)和总磷(TP), 分析方法参照《水和废水监

测分析方法》<sup>[13]</sup>。分析所得径流渗流各检测因子浓度值,结合测定的径流渗流水量,即能计算出缓冲带氮磷污染物径流渗流的分别去除量。

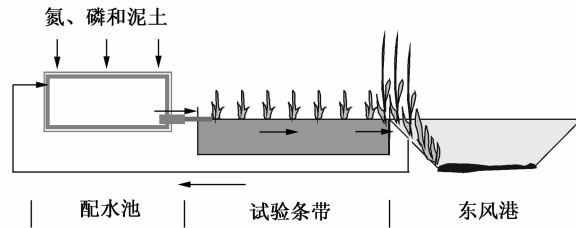


图 3 缓冲带现场试验工艺流程

Fig. 3 Flow chart of buffer strips field test

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 缓冲带滞缓径流效果及径流渗流水量分配

表 2 数据记录了试验过程中三角堰流量测定装置各项数值的平均值。从各缓冲带三角堰初始出水时间可以看出,随着缓冲带坡度的增大,径流初始出水时间逐渐缩短;19 m 长的 4 个不同坡度缓冲带中,2% 坡度径流初始出水时间为 16.4 min,而 5% 坡度则仅为 9.1 min,大大缩短了径流流经缓冲带表面的时间。说明种植相同植被的缓冲带,坡度越小,其滞缓径流的能力越强,径流水流经 19 m 长的 2% 坡度缓冲带的时间是 5% 坡度缓冲带的 1.8 倍。

表 2 试验过程三角堰装置记录数据平均值

Table 2 Mean data recorded by right triangle weir device of the experiment process

不同坡度 缓冲带	初始出水时间 /min	水位记录次数 /次	水位峰值 /mm	径流量 /m <sup>3</sup>	渗流量 /m <sup>3</sup>	径流量 /渗流量
2%	16.4	21.4	190.7	2.47	1.53	1.61
3%	13.7	22.6	197.5	2.66	1.34	1.99
4%	11.8	24.4	204.3	2.97	1.03	2.88
5%	9.1	25.6	208.9	3.12	0.88	3.54

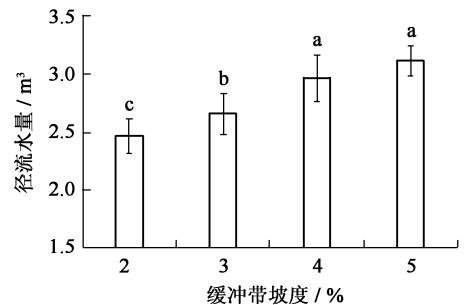
从计算所得的各缓冲带径流量平均值来看,在忽略蒸发、植物吸收等作用情况下,种植了百慕大植被的 4 个不同坡度缓冲带,坡度越小,水位记录次数、水位峰值均越小,由此计算出的径流量也越小,而相应的渗流量就越大;2% 坡度缓冲带平均径流量为 2.47 m<sup>3</sup>,其径流量、渗流量分配比值为 1.61,而 5% 坡度缓冲带径流量为 3.12 m<sup>3</sup>,其径流量、渗流量分配比值则达到 3.54,说明小坡度缓冲带在充分滞缓径流速度的同时,还提高了其土壤的水力渗透性。

研究对不同植被缓冲带各次试验径流量数据进行方差分析(ANOVA,为了保证方差齐性,对数据进行了平方根转换),结果如图 4 所示,说明除 4% 坡度和 5% 坡度之外,其它缓冲带两两之间径流量差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

### 2.2 缓冲带氮磷污染物去除量化

图 5 为不同坡度缓冲带径流渗流对 TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的去除量和去除率对比关系。可以看出:

(1) 对于污染物质量削减而言,各缓冲带渗流对氮磷污染物的去除能力要明显优于径流。4 个缓冲带



a、b、c 表示其两两之间的差异为显著水平( $P < 0.05$ )

图 4 试验过程不同坡度缓冲带径流量值

Fig. 4 Runoff from buffer strips in the different slope

TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 物质渗流去除量与径流去除量对比平均值分别为 2.19、1.66 和 2.10，渗流水对于 TN 和 TP 的降解能力要高于 NH<sub>3</sub>-N；2%、3%、4%、5% 坡度缓冲带对于氮磷污染物的渗流去除量与径流去除量的对比平均值也不同，分别为 2.32、2.15、1.82 和 1.64，坡度越小，比值越大，与各缓冲带径流、渗流水量的比值成反比。

(2) 对于根据各污染物去除量计算所得的污染物去除率而言，坡度越小，缓冲带渗流径流污染物总去除率越高。2% 坡度缓冲带 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 的总去除率均为最高，分别为 45.65%、50.05% 和 43.43%，而 5% 坡度缓冲带则最低，分别为 29.04%、32.83% 和 27.13%；对各污染物径流、渗流去除率进行对比分析发现，2%、3%、4%、5% 坡度缓冲带渗流水对 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 去除率的平均值分别占到总去除率的 71.66%、68.14%、64.39% 和 61.93%。

(3) 结合缓冲带面积，计算出单位面积总去除污染负荷量，2% 坡度缓冲带对 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP 的单位面积去除负荷均为最高，分别达到 0.661 g/m<sup>2</sup>、0.672 g/m<sup>2</sup> 和 0.044 g/m<sup>2</sup>，而 5% 坡度均为最低，分别为 0.420 g/m<sup>2</sup>、0.384 g/m<sup>2</sup> 和 0.026 g/m<sup>2</sup>。

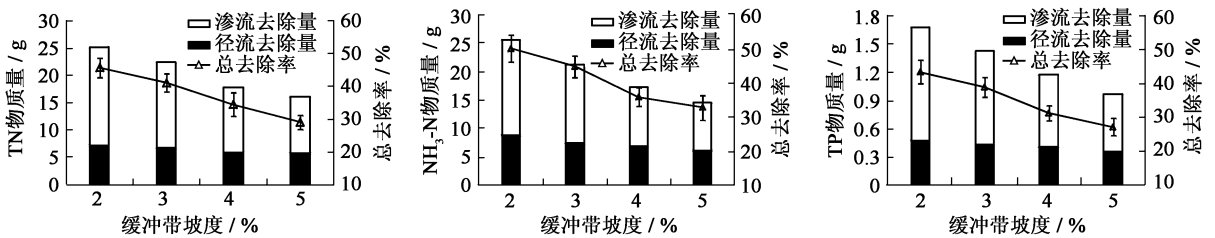


图 5 不同坡度缓冲带径流渗流污染物去除量及其去除率

Fig. 5 Removed pollution amount and removed efficiency by runoff and seepage from buffer strips in the different slope

研究发现，虽然本试验各缓冲带渗流水量要明显低于径流水量，但渗流氮磷污染物去除量却明显高于径流，这主要是由于渗流水中污染物质经过土壤过滤、植物根系吸收、微生物分解等多重作用，其污染物去除能力要明显优于径流，说明提高缓冲带土壤水力渗透性，就能有效提高其对面源污染物的去除能力。研究对多次试验各缓冲带渗流、径流水量比值和氮污染物去除量进行相关性分析可知，在 0.99 置信度下两者呈显著指数相关关系，相关系数为 0.929，其曲线拟合结果如图 6 所示。

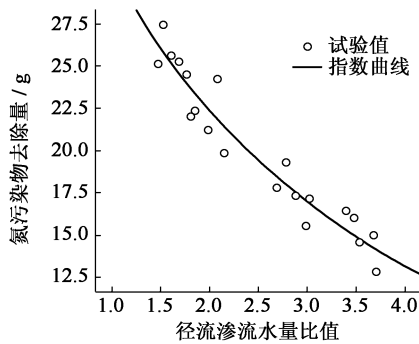
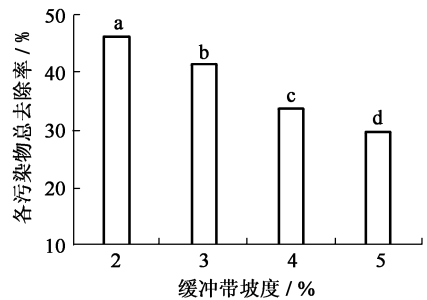


图 6 不同坡度缓冲带径流渗流水量比值与氮去除量曲线拟合关系

Fig. 6 Relation between the ratio of runoff and seepage water quantity and removal efficiency of total N in the different slope buffer strips



a、b、c、d 表示其两两之间的差异为显著水平 ( $P < 0.05$ )

图 7 不同坡度缓冲带对氮磷污染物去除能力差异分析

Fig. 7 N, P pollutants removal capacity of different slope buffer strips

研究还发现，随着缓冲带坡度的提高，无论是对于污染物总去除率还是单位面积去除污染负荷，其值就越小。在粘壤土和百慕大植被条件下，本研究采用的 4 种传统缓冲带坡度中，2% 坡度缓冲带对 TN、NH<sub>3</sub>-N、

TP 的单位面积去除负荷均最高, 分别达到  $0.661 \text{ g/m}^2$ 、 $0.672 \text{ g/m}^2$  和  $0.044 \text{ g/m}^2$ 。与 5% 坡度缓冲带相比, 2% 坡度缓冲带对 3 种污染物的去除率均比 5% 坡度高 15% 以上, 各污染物单位面积平均去除负荷也比 5% 坡度缓冲带提高 68.42%, 这跟坡度越缓渗流量越大、渗流对污染物的去除能力高于径流这两个结论是相符的。研究对不同坡度缓冲带各污染物总去除率数据进行方差分析(ANOVA, 为了保证方差齐性, 对数据进行了平方根转换), 结果如图 7 所示, 说明 2%、3%、4%、5% 坡度缓冲带对各污染物的总去除率两两之间差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

综上, 在缓冲带控制面源污染的研究与实践中, 虽然受到土地资源的限制, 不能建设足够宽度的缓冲带来提高其氮磷污染物净化效果, 但在选定土著植被的条件下, 可以综合考虑径流、渗流对污染物的净化效果差异, 适当减小缓冲带坡度, 并结合土壤改良和土壤动物培育等方面因素, 以增强缓冲带土壤的渗透能力, 最终提高缓冲带对径流氮磷污染物的去除能力。

### 3 结 论

(1) 植被缓冲带能有效滞缓降雨径流速度, 提高土壤渗透能力。19 m 长的 2% 坡度百慕大缓冲带径流初始出水时间和渗流量分别是 5% 坡度的 1.80 倍和 1.74 倍。

(2) 2%、3%、4% 和 5% 坡度百慕大缓冲带对 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 物质渗流去除量分别是径流去除量的 2.19 倍、1.66 倍和 2.10 倍。

(3) 2% 坡度百慕大缓冲带对径流污染物的去除能力最强, 其 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 单位面积去除负荷分别达到  $0.661 \text{ g/m}^2$ 、 $0.672 \text{ g/m}^2$  和  $0.044 \text{ g/m}^2$ 。

(4) 2% 坡度百慕大缓冲带对 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的总去除率均比 5% 坡度缓冲带高 15% 以上, 3 种污染物单位面积平均去除负荷也比 5% 坡度缓冲带提高了 68.42%。

#### 参考文献:

- [1] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. 水科学进展, 2009, 20(1):139-143. (QIAN Jing, WANG Chao, WANG Pei-fang, et al. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strip [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1):139-143. (in Chinese))
- [2] ANNA L, BRADLEY L, ROSS G. Bat activity on riparian zones and upper slopes in Australian timber production forests and the effectiveness of riparian buffers[J]. *Biological Conservation*, 2006, 129:207-220.
- [3] 陈小华, 李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1168-1175. (CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping. The eco-functions of ecological protection techniques of riverbank [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1168-1175. (in Chinese))
- [4] HILL A R, DEVITO K J. Subsurface denitrification in a forest riparian zone: Interactions between hydrology and supplies of nitrate and organic carbon[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51:193-223.
- [5] PETERJOHN W T, CORRELL D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of riparian forest[J]. *Ecology*, 1984, 65:1499-1475.
- [6] 杨胜天, 王雪蕾, 刘昌明, 等. 岸边带生态系统研究进展[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6):894-905. (YANG Sheng-tian, WANG Xue-lei, LIU Chang-ming, et al. Recent advances in the study of riparian ecosystems [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6):894-905. (in Chinese))
- [7] 郭怀成, 黄凯, 刘永, 等. 河岸带生态系统管理研究概念框架及其关键问题[J]. 地理研究, 2007, 26(4):789-798. (GUO Huai-cheng, HUANG Kai, LIU Yong, et al. A conceptual framework of riparian ecosystem management and its key problems [J]. *Geographical Research*, 2007, 26(4):789-798. (in Chinese))
- [8] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4):490-495. (PAN Cheng-zhong, SHANGGUAN Zhou-ping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4):490-495. (in Chinese))

- [9] 董凤丽, 袁俊峰, 马翠欣. 滨岸缓冲带对农业面源污染  $\text{NH}_4^+$ -N、TP 的吸收效果[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2004, 33(2):93-97. (DONG Feng-Li, YUAN Jun-feng, MA Cui-xin. Riparian buffer's cleaning effect on non-point source pollution from agriculture[J]. Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences, 2004, 33(2):93-97. (in Chinese))
- [10] 黄沈发, 吴建强, 唐浩, 等. 滨岸缓冲带对面源污染物的净化效果研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(5):722-728. (HUANG Shen-fa, WU Jian-qiang, TANG Hao, et al. Study on the clarification for riparian-buffer to non-point pollution[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5):722-728. (in Chinese))
- [11] 王敏, 吴建强, 黄沈发, 等. 不同坡度缓冲带径流污染净化效果及其最佳宽度研究[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 1-6. (WANG Min, WU Jian-qiang, HUANG Shen-fa, et al. Effects of slope and width of riparian buffer strips on runoff purification[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 1-6. (in Chinese))
- [12] 黄沈发, 陆贻通, 沈根祥, 等. 上海郊区旱作农田氮素流失研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2):50-53. (HUANG Shen-fa, LU Yi-tong, SHEN Gen-xiang, et al. Nitrogen losses from dry farming fields in Shanghai suburbs[J]. Rural Eco-Environment, 2005, 21(2):50-53. (in Chinese))
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:243-258. (Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Monitoring and analysis methods for water and wastewater[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002:243-258. (in Chinese))

## Quantitative study of the damping effect of buffer strips with different slopes on runoff and pollutant removal efficiency

WU Jian-qiang

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Using the constructed buffer strip experimental site and the hydrometric devices in the Dongfeng Port of Shanghai, a quantitative study is conducted to investigate the damping effect of buffer strips with different slopes on runoff and the pollutant removal efficiency of nitrogen (N) and phosphorous (P) from agricultural lands. The result shows that for a similar configuration of vegetation structure, the gentler the slope gradient is in relation to the damping effect of buffer strips, the slower the runoff moves, and the greater the hydraulic permeability is. For example, on a 19-m long buffer strip with a 2% slope, there will be a delay of 7.3 minutes for runoff starting to flow out of the strip compared to that with a 5% slope. The two slope configurations can lead to a ratio of 1:1.74 with respect to the seepage water. The improvement in the pollutant removal efficiency of N and P would be more significant in comparison with the damping effect on runoff when the slope gradient increases. For instances, on the buffer strips with 2%, 3%, 4% and 5% slopes, the improvement ratio of the two elements are 2.32, 2.15, 1.82 and 1.64, respectively. The gentler the slope gradient is in relation to the pollutant removal efficiency of N and P, the greater the total efficiency and unit area improvements will be. For example, on the buffer strips with 2% and 5% slopes, the two improvement ratios are found to be 1.56 and 1.66, respectively. The buffer strip with a 2% slope would have the highest pollutant removal efficiency of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3$ -N) and total phosphorous (TP), which are 0.661, 0.672 and 0.044  $\text{g}/\text{m}^2$ , respectively.

**Key words:** buffer strips; slope; stagnant runoff; pollutants removal; quantification