

植被缓冲带径流渗流水量分配及氮磷污染物去除定量研究

王敏,黄宇驰,吴建强*

(上海市环境科学研究院,上海 200233)

摘要:利用构建的缓冲带现场试验基地和设计的径流流量测定装置,对植被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,植被缓冲带有效滞缓了径流速度,并显著提高了缓冲带土壤的水力渗透能力,19 m 长的百慕大、高羊茅、白花三叶草缓冲带径流出水时间分别是空白对照的 2.46 倍、1.72 倍和 2.03 倍,渗流水量分别是空白对照的 3.01 倍、2.16 倍和 2.45 倍;植被缓冲带能有效去除农田径流氮磷污染物,百慕大、高羊茅、白花三叶草缓冲带对 NH_4^+-N 、 TN 、 TP 的总去除率分别比空白对照提高了 237%、268% 和 274%;植被缓冲带渗流对氮磷污染物的去除能力显著高于径流,渗流水量越大,缓冲带氮磷污染物的总去除率和单位面积去除负荷越高,试验各植被缓冲带 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 渗流去除量与径流去除量的比值分别达到 2.79、2.02 和 2.83.

关键词:植被缓冲带;径流;渗流;水量分配;污染物;定量化

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2607-06

Quantification Study on the Runoff and Seepage Distribution and N, P Pollutants Removal of the Vegetated Buffer Strips

WANG Min, HUANG Yu-chi, WU Jian-qiang

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

Abstract: By using the constructed buffer strips test base and the runoff hydrometric devices, a research on stagnant runoff and nitrogen (N), phosphorous (P) pollutants removal capacity of the vegetated buffer strips was conducted. The results show that the vegetated buffer strips might reduce the speed of runoff significantly and improve the hydraulic permeability of soil. The runoff water output time of 19 m buffer strips planted with *Cynodon dactylon*, *Festuca arundinacea* and *Trifolium repens* are 2.46, 1.72 and 2.03 times higher than the control (no vegetation) respectively; The seepage water quantity of three vegetation buffer strips are 3.01, 2.16 and 2.45 times higher than the control respectively as well. Total removal efficiency of the three buffer strips increase about 237%, 268% and 274% comparing with the control respectively. The N, P removal capacity of seepage is significantly higher than that of the runoff, the larger seepage water quantity will cause higher N, P total removal efficiency and removal loads of unit area. With different vegetated buffer strips, the TN , NH_4^+-N , TP removal ratio of seepage and runoff are 2.79, 2.02 and 2.83 respectively.

Key words: vegetation buffer strips; runoff; seepage; water quantity distribution; pollutants; quantification

20 世纪 80 年代中后期以来,由于湿地损失、生物多样性减少以及农业非点源污染等问题的提出,河岸缓冲带研究在美国、日本等国家得到了迅速发展^[1~3],与此同时,对于缓冲带控制面源污染作用方面的研究也随之兴起^[4~6].如 Hill 等^[7]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;Lowrance 等^[8]研究发现,河岸带生态系统能有效吸收径流水中带来的氮磷污染物,同时还能吸附大量泥沙颗粒及其中的重金属和有机污染物,并通过络合、螯合作用削减地下水中的持久性污染物;Peterjohn 等^[9]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^[10]、郭怀成^[11]等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;董凤丽等^[12]在较小尺度上研究了植被缓冲带对农业面源氮磷污染物净化效果.然而,众多研究都集中于定性分析植被缓冲带滞缓径流的效果和缓冲带对污染物浓度的削减,并未真正从缓冲带径流、渗流水量分配和氮磷污染物量的定量化去除等方面的研究来确定植被缓冲带滞缓径流和去除氮磷污染物的实际能力.

收稿日期:2010-03-18;修订日期:2010-06-08

基金项目:上海市科学技术委员会重大基础科研项目(08JC1417600)

作者简介:王敏(1978~),女,高级工程师,主要研究方向为农业面源污染防治与生态系统规划,E-mail:wangm@saes.sh.cn

* 通讯联系人,E-mail:wujq@saes.sh.cn

本试验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研究,旨在摸清植被缓冲带滞缓径流、径流渗流水量的分配及其对氮磷污染物量的实际去除能力,以期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。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 植被

供试植被是上海地区常见的3种草本植被。百慕大(*Cynodon dactylon*):多年生暖季型草本,耐践踏、抗高温、抗干旱、繁殖速度快、恢复力强,适合于华东地区生长,绿期可达270 d左右;高羊茅(*Festuca arundinacea*):多年生冷季型草本,耐热、耐寒、抗病、不耐践踏,适应性强,适合于温暖湿润地区生长,四季长绿,是冷季型草本中最耐热品种;白花三叶草(*Trifolium repens*):多年生冷季型草本,耐热、耐寒、耐荫、耐旱、耐践踏、耐贫瘠土壤,适应性较强,喜温暖气候,适合于我国大部分地区种植,上海地区保持四季常绿。

1.1.2 水样

根据上海地区农业面源污染特征^[13,14],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/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Main pollutants concentration of water samples/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

TN	NH_4^+-N	TP	SS
13.43 ± 0.41	12.50 ± 0.54	0.93 ± 0.08	411.88 ± 20.85

1.2 试验装置

1.2.1 试验条带

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,经度 $121^{\circ}236'$,纬度 $31^{\circ}257'$,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,当地土壤类型为青紫泥和沟干泥,土质属黏壤土,质地略显黏重。

试验缓冲带共4条,3个植被缓冲带加空白对照,每个条带长19 m,宽2 m,坡度2%。每2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。

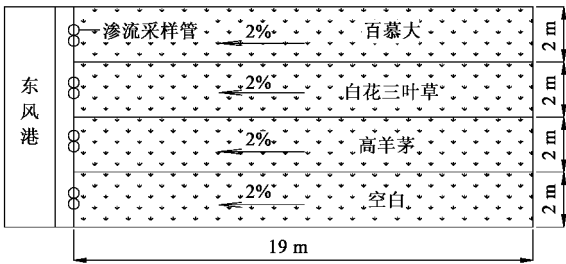


图1 缓冲带试验条带示意

Fig. 1 Chart of the buffer strips

1.2.2 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,制作径流流量直角三角形薄壁堰计量装置,整个装置采用薄型钢板制作,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。

1.3 试验方法

1.3.1 径流渗流量确定

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

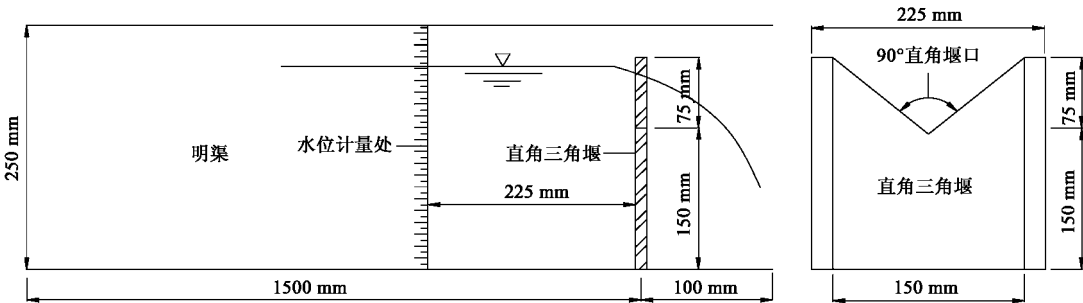


图2 直角三角堰装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of right triangle weir device

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 m³. 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 ($Q = 1.4H^{\frac{5}{2}}$) 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 .

1.3.2 氮磷污染物去除量化

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 .在设置的 3 个植被缓冲带和空白对照分别进行试验研究 ,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 (ammonia nitrogen , NH₄⁺-N)、总氮 (total nitrogen ,TN) 和总磷 (total phosphorus ,TP) ,分析方法参照文献 [15] .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 .

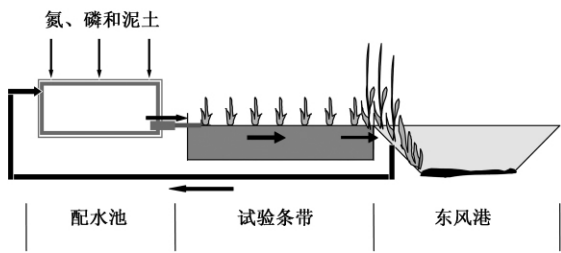


图 3 缓冲带现场试验工艺流程
Fig.3 Process flow chart of buffer strips field test

2 结果与讨论

2.1 缓冲带滞缓径流效果及径流渗流量分配

表 2 数据记录了试验过程中各项数值的平均值 .从各缓冲带三角堰初始出水时间可以看出 ,19 m 长的 3 种植被缓冲带径流平均初始出水时间为 13.8 min ,而空白对照缓冲带在配水池出水后仅 6.7 min ,径流水就迅速到达缓冲带末端 ,说明植被的存在 ,有效地滞缓了径流速度 .

从计算所得的各缓冲带径流量平均值来看 ,种植了草本植被的 3 个缓冲带径流量明显低于空白对照 ,3 种植被缓冲带平均径流量为 2.71 m³ ,而空白对照则高达 3.5 m³ .从各缓冲带径流、渗流量分配比来看 ,空白对照径流渗流分配比为 6.84 ,是各植被缓冲带的 2.6 ~ 4.2 倍 .说明植被缓冲带在有效滞缓径流速度的同时 ,加上其植物根系的导流作用 ,明显提高了植被缓冲带的渗流能力 .

结合现场不同植被生长情况及吴建强等^[16]研究结果 ,百慕大 6 ~ 10 月生长茂盛 ,并且其密集的匍匐茎覆盖于整个缓冲带表面 ,其滞缓径流速度的能力最强 ,初始平均出水时间长达 16.4 min ,平均径流量则最小 ,仅为 2.47 m³ ;而高羊茅由于在夏季高温期处于休眠状态 ,生长情况不佳 ,导致其滞缓径流能力低于其他 2 种植被缓冲带 ,径流量也是三者中最大 ,为 2.90 m³ ;白花三叶草虽然在生物量鲜重等方面优于百慕大 ,但是其为豆科类植物 ,缺少象百慕大一样覆盖于整个地表面的匍匐茎 ,因此其滞缓径流能力和径流量都处于百慕大和高羊茅之间 .

图 4 直观地反映了整个试验过程不同植被缓冲带径流量差别 ,可以看出 ,由于缺少植被的滞留作用 ,空白对照各次试验径流量相对植被缓冲带更为稳定 ,每次径流量都在 3.35 ~ 3.60 m³ 之间 ;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) ,结果显示 ,除高羊茅和白花三叶草之外 ,其他缓冲带两两之间径流量差异均为显著水

表 2 试验过程三角堰装置记录数据平均值
Table 2 Mean records of right triangle weir device during the experiment process

缓冲带植被类型	初始出水时间 /min	水位记录次数 /次	水位峰值 /mm	径流量 /m ³	渗流量 /m ³	径流量 渗流量
百慕大	16.4	21.4	190.7	2.47	1.53	1.61
高羊茅	11.5	24.4	203.2	2.90	1.10	2.64
白花三叶草	13.6	23.2	198.9	2.75	1.25	2.20
空白对照	6.7	26.6	212.8	3.49	0.51	6.84

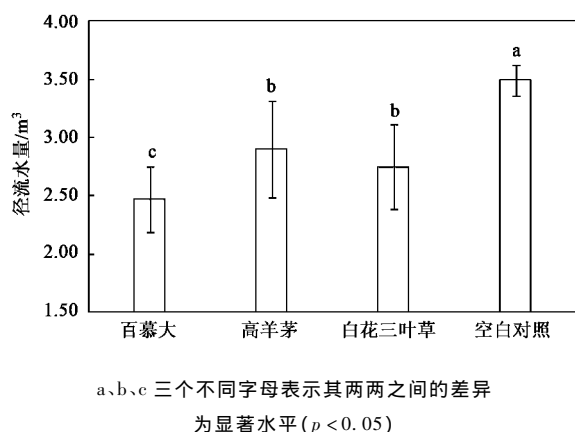


图4 试验过程不同植被缓冲带径流水量值

Fig. 4 Runoff volume of the different vegetated buffer strips

平 ($p < 0.05$).

2.2 缓冲带氮磷污染物去除定量化

图5~图7分别显示了不同植被缓冲带径流渗流对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除量和去除率对比关系,可以得出如下结论.

(1) 植被缓冲带对农田径流氮磷污染物质的去除能力要明显优于空白对照,根据物质去除量计算所得的氮磷污染物去除率,3种植被缓冲带对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的总去除率分别比空白对照提高了237%、268%和274%.百慕大缓冲带对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的总去除率均是最高,分别达到了45.7%、50.0%和43.4%,这主要是得益于百慕大缓冲带充分滞缓径流提高渗流能力的作用,而白花三叶草由于豆科类植物所特有的固氮作用,对TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除能力也较强,径流TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均高于其他3个缓冲带,总去除率也均超过了40%.

(2) 各缓冲带渗流对农田氮磷污染物的去除能力要明显优于径流,TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP物质渗流去除量与径流去除量对比平均值分别为2.79、2.02和2.83,说明渗流水对于TN和TP的降解能力要高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$;对于不同缓冲带,其氮磷污染物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、2.11、1.79和3.96,说明在3种草本植被中,白花三叶草径流对氮磷污染物的净化效果要略优于其他2种,而空白对照由于缺少植被对径流污染物的拦截作用,渗流污染物去除量与径流去除量比值特别高.

(3) 结合缓冲带面积,计算出单位面积径流渗流总污染负荷去除量,百慕大缓冲带对TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的单位面积去除负荷均是最高,分别达到

0.661、0.672和0.044 g/m^2 ,其次是白花三叶草缓冲带,由于其植被固氮作用,TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 单位面积去除负荷也均高于0.6 g/m^2 ,TP则为0.035 g/m^2 .

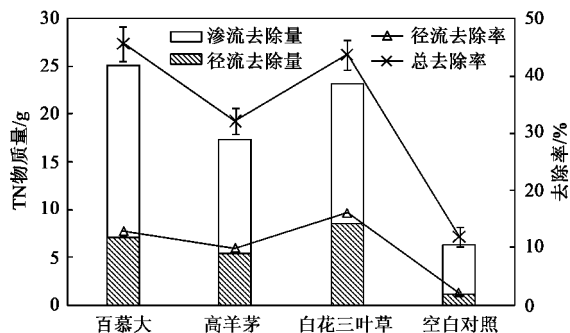


图5 不同植被缓冲带径流渗流TN去除量及其去除率

Fig. 5 TN removal amount and efficiency of runoff and seepage with the different vegetation buffer strips

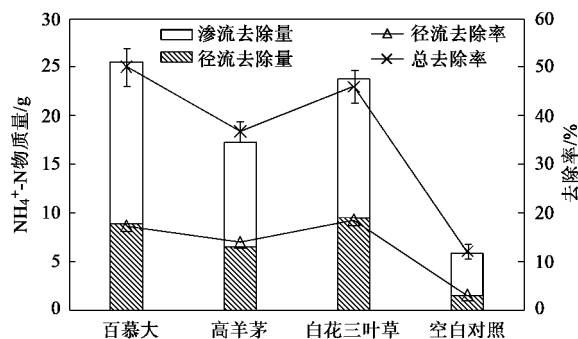
图6 不同植被缓冲带径流渗流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除量及其去除率

Fig. 6 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal amount and efficiency of runoff and seepage with the different vegetation buffer strips

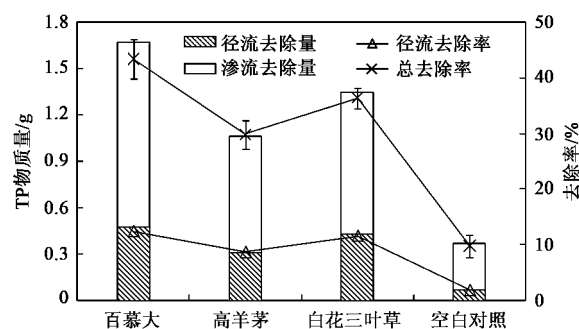


图7 不同植被缓冲带径流渗流TP去除量及其去除率

Fig. 7 TP removal amount and efficiency of runoff and seepage along the different vegetation buffer strips

本研究的几种植被缓冲带中,无论是氮磷总体去除率还是单位面积污染负荷截留量,都是百慕大缓冲带最高,空白对照最低,这跟百慕大植被密集的匍匐茎覆盖于整个缓冲带表面,有效滞缓径流并增

加渗流水量是密切相关的.说明缓冲带植被的存在,能充分滞缓径流,使其具有较强的土壤水力渗透性,对地表径流及其携带的面源污染物充分发挥截留、储存、吸收、转化等作用,有效阻截径流水体中的氮磷营养物质,从而显著提高缓冲带净化径流污染物的能力.研究对多次试验3种植被缓冲带径流、渗流水量比值和氮污染物总去除率进行相关性分析可知,在0.99置信度下两者的相关系数为0.875,说明两者相关性显著,两者曲线拟合结果如图8.

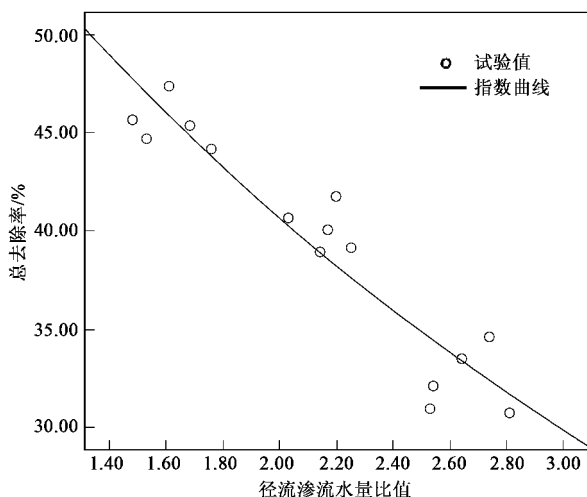


图8 植被缓冲带径流渗流水量比值与总去除率曲线拟合关系

Fig.8 Relationship between the runoff and seepage volume ratio and TN removal efficiency with different gradient buffer strips

研究还发现,虽然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.因此,在缓冲带控制农业面源污染的研究与实践中,虽然受到土地资源和坡地结构等方面的限制,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,但可以综合考虑径流渗流对污染物的净化效果差异,从植被选择、土壤改良和土壤动物培育等多方面考虑提高缓冲带土壤的渗透能力,以最终提高缓冲带对农田径流氮磷污染物的去除能力.

3 结论

(1) 植被缓冲带,尤其是生长密集的草本植被,能有效滞缓径流速度,提高土壤水力渗透能力.3种植物缓冲带滞缓径流能力为:百慕大>白花三叶草>高羊茅;百慕大缓冲带径流初始出水时间比

空白对照延长9.7 min,渗流水量可达到空白对照的3倍.

(2) 植被缓冲带对农田径流氮磷污染物质的去除能力要明显优于空白对照,3种植物缓冲带对TN、 NH_4^+-N 、TP的总去除率分别比空白对照提高了237%、268%和274%.

(3) 缓冲带渗流对氮磷污染物的去除效果要明显优于径流.其中,百慕大植被缓冲带渗流TN、 NH_4^+-N 、TP去除量分别是径流去除量的2.54、1.91、2.51倍.

(4) 径流渗流水量比值越小,氮磷污染物整体去除能力和单位面积去除负荷均越高,对于缓冲带控制农业面源污染的实际应用,应尽可能地采用多种措施提高缓冲带土壤的水力渗透能力,以提高其对农田氮磷污染物的去除能力.

参考文献:

- [1] Gilliam J W. Riparian wetlands and water quality [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(3): 896-900.
- [2] Heathwaite A L, Griffith P, Parkinson R J. Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures [J]. *Journal of Soil Use Management*, 1998, **14**: 142-148.
- [3] Nakamura F, Yamada H. Effects of pasture development on the ecological functions of riparian forests in Hokkaido in northern Japan [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **2**(4): 539-550.
- [4] Cobourn J. How riparian ecosystems are protected at Lake Tahoe [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, **42**(1): 35-43.
- [5] 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.
- [6] Greenway M. Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**: 121-128.
- [7] 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.
- [8] Lowrance R, Todd R, Fail J, et al. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds [J]. *Bioscience*, 1984, **34**: 374-377.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 董凤丽,袁俊峰,马翠欣.滨岸缓冲带对农业面源污染 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.
- [13] 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.
- [14] 黄沈发,沈根祥,唐浩等.上海郊区稻田氮素流失研究[J].环境污染与防治,2005,27(9):651-654.
- [15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.243-258.
- [16] 吴建强,黄沈发,黄宇弛.污染负荷及植被生物量变化对缓冲带污染物净化效果的影响[J].环境工程学报,2008,2(10):67-71.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2009年11月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2008年“百种中国杰出学术期刊”评选结果.《环境科学》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”的称号,这也是自首次评选以来连续8次获此殊荣.

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.