

DOI: 10.11766/trxb201806190328

# 不同规格生态沟渠对排水污染物处理能力的研究\*

刘福兴<sup>1, 2</sup> 王俊力<sup>1, 2</sup> 付子轶<sup>1, 2†</sup>

(1 上海市农业科学院, 上海 201403)

(2 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

**摘要** 利用三种不同深度规格的生态沟渠 ( $E_{0.80}$ 、 $E_{1.05}$ 和 $E_{1.30}$ )，通过控制相同的表面水力负荷，比较研究了动态进水 (TN 0.86 ~ 6.13  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP 0.11 ~ 0.28  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 条件下生态沟渠对农业面源主要污染物的去除效果，同时考察其耐冲击负荷能力和适宜建造长度。结果表明：整个试验期间，三种不同深度规格的生态沟渠对铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和悬浮物 (SS) 的去除率均达到 50% 以上，其中  $E_{1.30}$  对污染物的去除效率较高， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 和 SS 的总平均去除率分别为 64.8%、63.1%、71.8% 和 60.8%。同时， $E_{1.30}$  的污染物出水浓度较为稳定，耐冲击负荷能力相对较强。进水浓度较高情况下， $E_{1.30}$  在 TN、TP 出水浓度为 2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 0.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时所需长度分别为 27.4 m 和 4.9 m，为三种规格生态沟渠中最短。表明生态沟渠是有效去除农业面源污染物的技术，在实际应用中可因地制宜地建设  $E_{1.30}$  规格的生态沟渠，并可辅以高效吸附氮磷材料等其他措施，进一步提高生态沟渠对农业面源污染物的去除能力。

**关键词** 生态沟；去除效率；农业面源污染；表面水力负荷；氮；磷

**中图分类号** X524；S19 **文献标识码** A

随着我国农业的快速发展，以及工业废水和城市生活污水等点源污染得到有效控制，农业面源污染的重要性越来越突出。据生态环境部 2010 年发布的《全国第一次污染源普查公报》，我国农业面源污染物总氮和总磷的排放量占总排放量的 57.2% 和 67.4%，已成为水体污染的主要来源。如何有效控制农业面源污染物向水体的排放，是当前学者关注和研究的热点和难点问题。

在多年研究的基础上，杨林章等<sup>[1]</sup>系统总结提出了农业面源污染防控的 4R 技术体系“源头减量 (Reduce) - 过程阻断 (Retain) - 养分再利用

(Reuse) - 水体修复 (Restore)”，并在全国范围内得到了推广应用。其中过程阻断是指在污染物向水体迁移过程中，通过一些物理的、生物的以及工程的方法等对污染物进行拦截阻断和强化净化，延长其在陆域的停留时间，最大化减少其进入水体的污染物质。目前应用比较普遍的有生态拦截沟渠技术<sup>[2]</sup>、生物篱技术<sup>[3]</sup>、生态拦截缓冲带技术<sup>[4]</sup>等。其中，由传统农田排水沟渠发展而成的生态沟渠应用最为广泛，其由沟渠、基质和植物组成，具有生态性和生物性的特殊优点，并可根据地形特征来构建<sup>[5]</sup>。生态沟渠不仅可以用来净化农

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07203-005) 和上海市科委长三角科技联合攻关专项 (17295810602) 资助 Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2017ZX07203-005) and the Yangtze River Delta Technology Projects of Shanghai Municipal Science and Technology Commission (No. 17295810602)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 675421692@qq.com

作者简介: 刘福兴 (1975—), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 主要从事水环境治理与生态修复研究。E-mail: liufuxing@126.com

收稿日期: 2018-06-19; 收到稿件修改日期: 2018-09-04; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-12-06

田径流排水,还具有湿地生态系统的功能,在维持生态系统物种多样性、促进生态系统生产力和养分循环、净化水质等方面起着重要作用<sup>[6-7]</sup>。其对径流污染物的去除净化主要通过减缓流速、植物吸收、基质吸附、泥沙沉降、微生物硝化反硝化等发挥作用<sup>[8]</sup>。生态沟渠的规格以及内部构造组合等均会影响生态沟渠对污染物的削减效果,加上农业面源污染物浓度具有极大的时空变异性,因此亟需系统考察生态沟渠的规格及其构造组成对污染物削减效果及其稳定性、耐冲击负荷能力等的影响,寻求污染物去除效率高且稳的最佳生态沟渠。

为此,本研究利用太湖流域平原河网区常用的三种不同深度规格的生态沟渠,通过模拟农业面源污水,比较研究了相同表面水力负荷下三种沟渠对动态连续进水条件下铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)和悬浮物(SS)的去除效果以及耐冲击负荷能力,并分析了进水浓度较高情况下,生态沟渠出水达到地表水环境质量V类标准(GB3838-2002)所需长度,以期为生态拦截沟渠的应用设计(规格以及长度等)提供科学参考,从而提高对农业面源(尤其是种植业面源)污染物的拦截净化效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在上海市农业科学院庄行综合试验基地(30°53' N, 121°23' E)进行。研究区为亚热带季风气候,多年平均降水量、蒸发量、气温分别为1 192 mm、1 237 mm、16.1℃。全年日照时数1 900 h,无霜期224 d。



图1 生态沟渠试验区

Fig. 1 Ecological ditch experimental site

### 1.2 试验设计

设计目前生产上较常见的三种规格的生态沟渠,渠深0.80 m ( $E_{0.80}$ )、1.05 m ( $E_{1.05}$ )、1.30 m ( $E_{1.30}$ ),长度各90 m,沟渠内均种植相同密度植被,沟壁为带孔预制板,孔内为狗牙根(*Cynodon dactylon*),沟底为常绿苦草(*Vallisneria spiralis*,购自上海海洋大学)(图1)。试验开始前,生态沟渠稳定一段时间并对水量进行调试。

于2013年7月23日开始动态进水试验,试验持续20 d,期间的气温和降雨情况见图2。试验进水根据当地农田尾水中的氮磷浓度<sup>[9]</sup>,用附近河道水加尿素和 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 配置,进水TN 0.86~6.13  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP 0.11~0.28  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。沟渠断面规格及采样点断面设置见图3,分别在进水处(1#)、22.5 m处(2#)、45 m处(3#)、67.5 m处(4#)及出水(5#)设置采样点。试验最初2 d每1 d采集水样一次,之后间隔1 d采样一次直至试验结束。

水样铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )采用纳式试剂分光光度法测定,总氮采用过硫酸钾氧化法测定,总磷采用钼锑抗分光光度法测定,悬浮物经过滤后,105℃烘干至恒质量后测定<sup>[10]</sup>。

### 1.3 试验参数设计

试验过程中,维持三种生态沟渠水位处于同一水平,通过控制不同规格沟渠的进水流量,控制三种规格生态沟渠的表面水力负荷保持一致。综合考虑进水水质分布特征、处理效率及经济性,借鉴表流湿地水力负荷后,确定沟渠表面水力负荷( $N$ )为0.60  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,在保证沟渠水位及相同

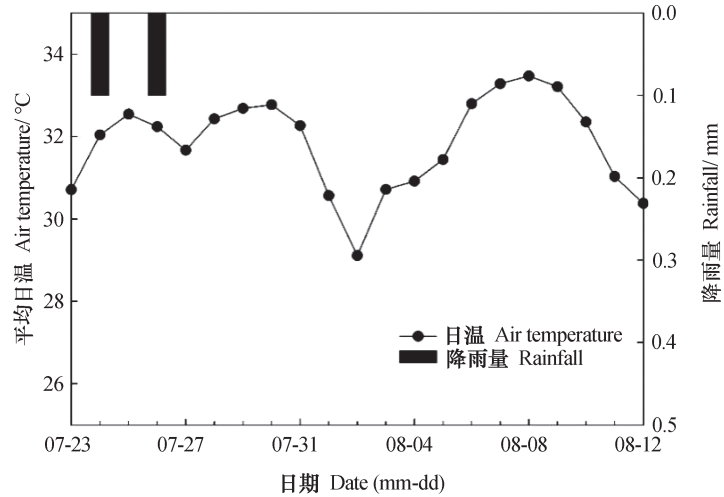


图2 试验期间平均日温和降雨量变化

Fig. 2 Mean daily air temperature and rainfall during the experimental period

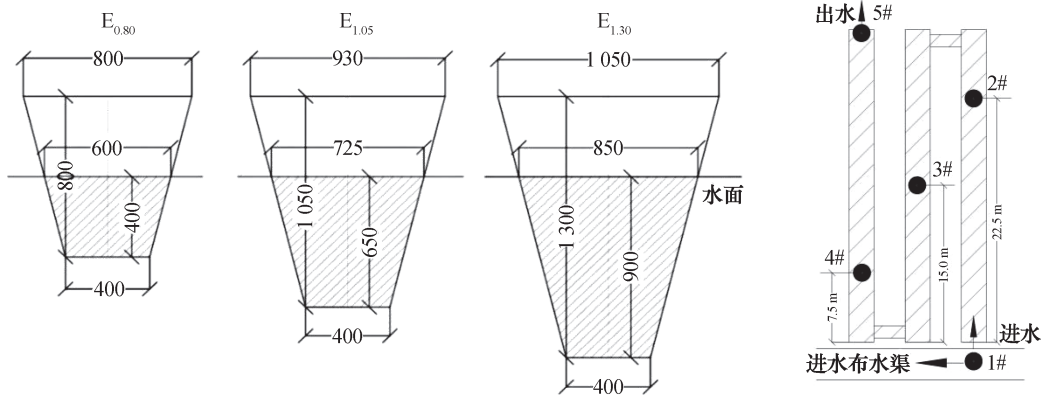


图3 生态沟渠断面规格图与取样断面设置

Fig. 3 Sectional of the ecological ditch relative to specification and set-up of sampling section

的表面水力负荷下，计算三种规格沟渠的进水流量 ( $Q$ )。计算方法如下：

沟渠有效容积  $V = S \times L$   
 沟渠水表面积  $S_A = N \times L$

进水流量  $Q = (N \times S_A) / 24 \text{ h}$

水力停留时间  $HRT = V / Q$

式中， $S$ 为有效断面面积， $L$ 为沟渠长度， $N$ 为沟渠表面水力负荷。具体试验参数如表1所示。

表1 不同规格生态沟渠实验基本设计参数表

Table 1 Parameters of basic design of the ditch relative to specifications

沟渠规格 Specification of ditches	表面水力负荷Surface hydraulic loading / ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	水深 Water depth / m	长度 Length / m	有效断面面 积Effective sectional area/ $\text{m}^2$	有效容积 Effective volume / $\text{m}^3$	水表面 积Water surface area / $\text{m}^2$	进水流量 Inflow flux /( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	水力停留时 间Hydraulic retention time /h
$E_{0.80}$	0.60	0.40	90	0.20	18.0	54.0	1.35	13.3
$E_{1.05}$	0.60	0.55	90	0.37	32.9	65.3	1.63	20.2
$E_{1.30}$	0.60	0.80	90	0.56	50.6	76.5	1.91	26.5

### 1.4 数据统计与分析

采用污染物去除率的变异系数来表征污染物去除效果的稳定性:

$$\text{变异系数} = \frac{\text{标准偏差}}{\text{平均值}} \times 100\%$$

采用污染物表面负荷与污染物面积去除量相关系数来表征耐冲击负荷能力, 其中污染物表面负荷表示沟渠单位面积每天接受的进水中污染物的量:

$$\text{污染物表面负荷} (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = C_{in} \times N$$

式中,  $C_{in}$ 为进水浓度,  $N$ 为沟渠表面水力负荷。

$$\text{污染物面积去除量} (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = (C_{in} - C_{out}) \times Q \times 24 \text{ h} / S_A$$

式中,  $C_{in}$ 为进水浓度,  $C_{out}$ 为出水浓度,  $Q$ 为进水量,  $S_A$ 为沟渠水表面积。

采用SPSS 13.0软件进行统计分析, 采用Sigmaplot 12.0软件进行制图。

## 2 结果

### 2.1 生态沟渠对主要污染物的去除效果

试验期间生态沟渠进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度为  $0.17 \sim 1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均  $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $E_{0.80}$ 、 $E_{1.05}$ 、 $E_{1.30}$  三种沟渠的最终出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度分别为  $0.02 \sim 0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $0.05 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.07 \sim 0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均总去除率分别为  $61.4\%$ 、

$54.7\%$ 、 $64.8\%$ , 可见  $E_{1.30}$  处理效率相对最高, 而且出水浓度比较稳定 (图4, 表2)。三种规格生态沟渠对TN的去除效果也以  $E_{1.30}$  的最好, 出水TN浓度平均  $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低于  $E_{0.80}$  (平均  $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $E_{1.05}$  (平均  $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 平均去除率  $63.1\%$  ( $44.7 \sim 87.1\%$ ), 也高于  $E_{0.80}$  ( $58.7\%$ ) 和  $E_{1.05}$  ( $62.5\%$ ), 而  $E_{1.05}$  和  $E_{1.30}$  的TN去除效果均比较稳定, 去除率的变异系数分别为  $21.9\%$  和  $23.1\%$ 。

三种规格生态沟渠对TP的去除效果要普遍高于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和TN, 平均去除率分别为  $64.0\%$  ( $E_{0.80}$ )、 $70.2\%$  ( $E_{1.05}$ ) 和  $71.8\%$  ( $E_{1.30}$ ), 以  $E_{1.30}$  最高, 且去除效果相对最为稳定, 去除率的变异系数最小, 为  $11.9\%$ , 出水浓度变化在  $0.02 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。

与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和TN结果类似, 三种规格生态沟渠对SS的去除效果整体较好, SS总去除率分别为  $E_{0.80}$  平均  $58.5\%$ ,  $E_{1.05}$  平均  $50.3\%$ ,  $E_{1.30}$  平均  $60.8\%$ ;  $E_{0.80}$ 、 $E_{1.05}$  和  $E_{1.30}$  最终出水的SS平均浓度分别为  $20.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $2.0 \sim 52.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $23.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $6.0 \sim 56.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $18.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $2.0 \sim 40.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 远低于进水SS浓度的  $49.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $16.0 \sim 70.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。整体上,  $E_{1.30}$  对SS的处理效率相对较高且较为稳定。

表2 不同规格生态沟渠对面源污水中污染物的去除效率和变异系数

Table 2 Removal efficiency of pollutants form non-point source pollution and coefficient variation relative to specification of the ditch

沟渠规格 Specification of ditches	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$		TN		TP		SS	
	去除效率	变异系数	去除效率	变异系数	去除效率	变异系数	去除效率	变异系数
	Removal	Coefficient	Removal	Coefficient	Removal	Coefficient	Removal	Coefficient
	efficiency/%	variation/%	efficiency/%	variation/%	efficiency/%	variation/%	efficiency/%	variation/%
$E_{0.80}$	$61.4 \pm 29.0$	47.2	$58.7 \pm 18.6$	31.7	$64.0 \pm 16.3$	25.5	$58.5 \pm 26.7$	45.7
$E_{1.05}$	$54.7 \pm 31.2$	57.1	$62.5 \pm 13.7$	21.9	$70.2 \pm 13.8$	19.7	$50.3 \pm 36.6$	73.7
$E_{1.30}$	$64.9 \pm 14.2$	21.9	$63.1 \pm 14.6$	23.1	$71.8 \pm 8.6$	11.9	$60.8 \pm 21.8$	35.8

### 2.2 主要污染物沿生态沟渠长度的浓度变化

生态沟渠主要拦截农田尾水中的氮、磷, 因此, 本研究仅对进水浓度较高情况下 ( $\text{TN} \geq 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TP} \geq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), TN、TP沿生态沟渠长度的浓度变化情况进行分析, 以期探索适宜建设长度。对不同规格生态沟渠长度与TN、TP浓度的变化进行拟合可以看出, 随着长度的增

加, 三种规格沟渠中TN、TP浓度均逐渐降低 (图5)。  $E_{0.80}$  和  $E_{1.05}$  的TN浓度与沟渠长度之间的递减规律较好, 拟合方程相关系数分别为  $0.9811$  和  $0.9916$ 。三种规格沟渠的TP浓度与长度之间的递减规律均较好,  $E_{0.80}$ 、 $E_{1.05}$  和  $E_{1.30}$  的相关系数分别到达  $1$ 、 $0.9838$  和  $0.9678$ 。虽然  $E_{1.30}$  沿程上的TN、TP浓度波动相对较大, 但是在进水浓度一致的情

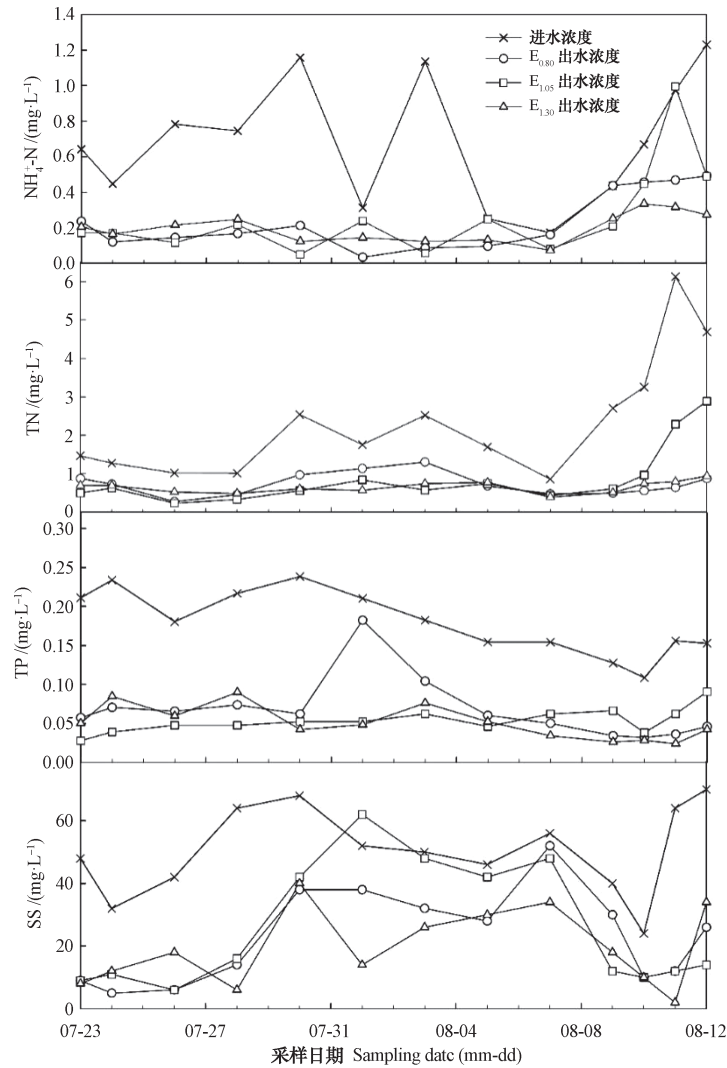


图4 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和悬浮物 (SS) 浓度变化情况

Fig. 4 Dynamic change in concentration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, TP and SS in ecological ditch relative to specification

况下, 该沟渠在22.5 m和45 m时的出水TN、TP平均浓度最低, 说明短距离的 $E_{1.30}$ 生态沟渠对N、P就有较好的处理效果。

将TN、TP出水浓度统一设置为地表水环境质量V类标准 (GB3838-2002), 即: TN为 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 根据拟合方程可以计算出达标所需沟渠的适宜长度 (表3), 综合而言, 在进水浓度统一的情况下,  $E_{1.30}$ 处理TN、TP所需长度与 $E_{0.80}$ 和 $E_{1.05}$ 相比较短, 分别为27.4 m和4.9 m; 其次为 $E_{0.80}$ , 处理TN、TP所需长度分别为54.5 m和9.8 m。

### 2.3 单位面积去除量与耐冲击负荷能力

由于表面水力负荷相同, 因此在同一进水浓度的情况下, 三种规格生态沟渠污染物表面负荷也相

同。试验期间,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进水表面负荷为 $0.10 \sim 0.71 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ; TN为 $0.52 \sim 3.68 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ; TP为 $0.07 \sim 0.17 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ; SS为 $9.60 \sim 42.00 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

从各污染物表面负荷与三种规格生态沟渠的污染物面积去除量关系来看 (图6), 二者均显著相关 ( $P < 0.05$ ), 三种规格生态沟渠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的处理能力均较好,  $E_{1.30}$ 的耐冲击负荷能力相对较强,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的相关系数分别为0.973和0.997,  $E_{1.05}$ 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN相关系数最小, 耐冲击负荷能力相对较弱。而三种规格生态沟渠对TP的处理能力也均较好,  $E_{1.05}$ 对TP的耐冲击负荷能力最强 ( $r=0.960$ ),  $E_{1.30}$ 其次 ( $r=0.876$ )。相比较而言,  $E_{1.30}$ 对SS的处理能力较好, 耐冲击负荷能力也最强 ( $r=0.740$ )。

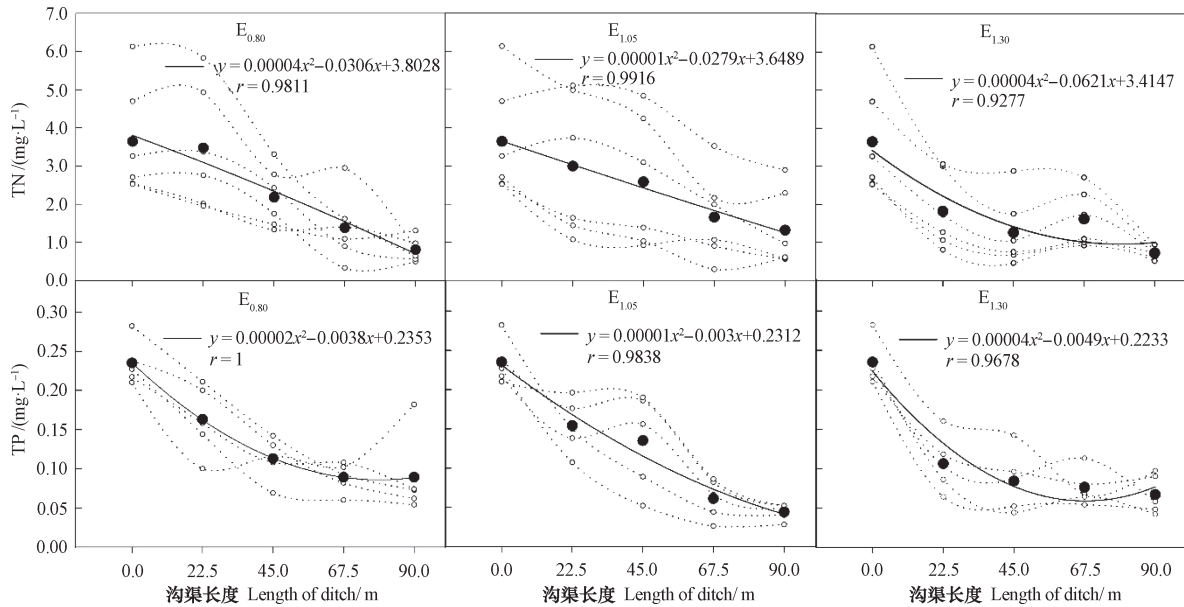


图5 不同规格生态沟渠中总氮 (TN) 和总磷 (TP) 沿程浓度变化

Fig. 5 Dynamic change in concentration of TN and TP along the ditch relative to specifications

表3 不同规格生态沟渠TN、TP达到地表水V类标准的适宜长度

Table 3 Optimal length of the ditch to reduce TN and TP to Class V standard for surface water

污染物 Pollutant	达到V类标准所需长度 Optimum length /m		
	E <sub>0.80</sub>	E <sub>1.05</sub>	E <sub>1.30</sub>
TN	54.5	60.8	27.4
TP	9.8	10.5	4.9

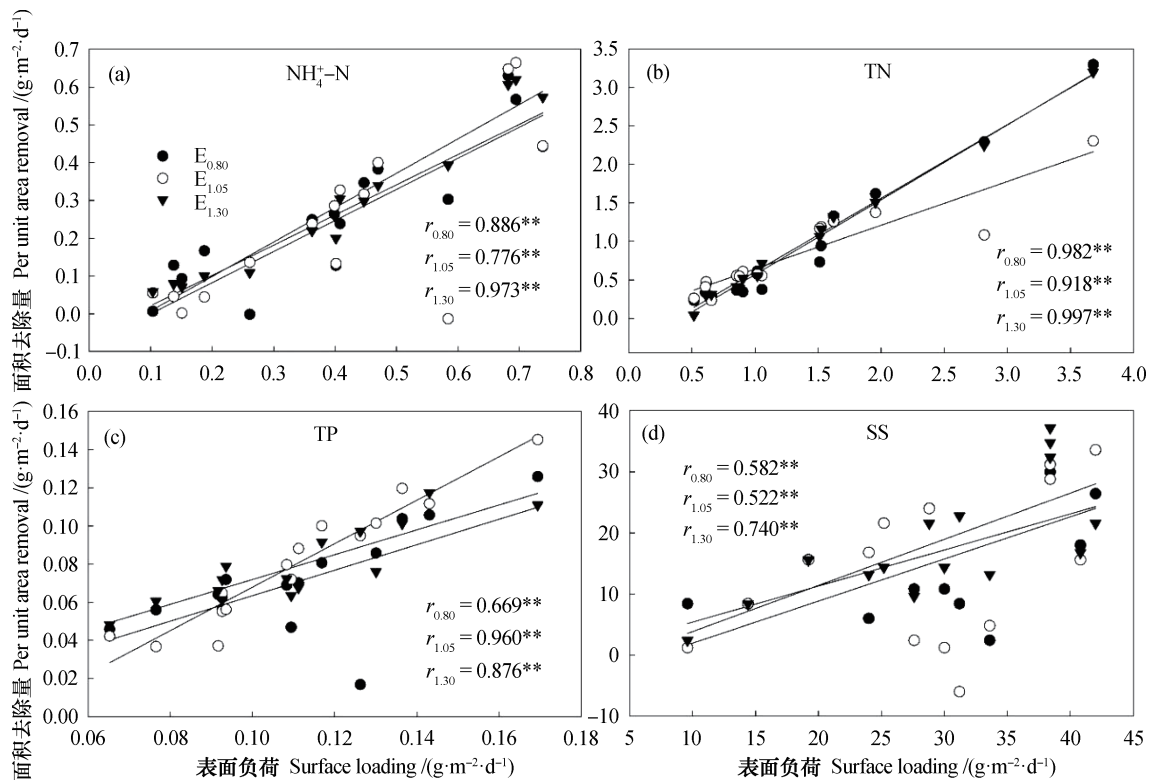


图6 不同规格生态沟渠中铵态氮 (a)、总氮 (b)、总磷 (c) 和悬浮物 (d) 表面负荷与面积去除量的关系

Fig. 6 Relationships between surface loading and per unit area removal rate of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (a), TN (b), TP (c) and SS (d) in the ditch relative to specification

### 3 讨 论

由于氮、磷等营养物质的输入，农业面源污染已成为水体富营养化的主要污染源，生态沟渠技术是当前研究的控制技术之一<sup>[11]</sup>。研究表明，生态沟渠对农田排水中氮磷拦截效果明显优于传统的混凝土沟渠和土质沟渠<sup>[12]</sup>。但是生态沟渠对氮磷的去除效果具有较大的时空变异性，有学者利用生态沟渠对稻田径流水中污染物进行拦截，研究表明其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的净化效率为31.81%、54.18%和58.21%<sup>[13]</sup>；还有学者在灌溉和降雨条件下对生态沟渠的氮磷输出特征进行了研究，其对TN、TP去除率达64%和70%<sup>[14]</sup>，造成氮磷去除效果不同的原因可能是由于生态沟渠规格不同引起的，沟渠的大小、边坡形式、断面尺寸、水力半径、纵坡等几何尺度均影响着水体中氮磷的转化和去除<sup>[15]</sup>，如上述研究中的生态沟渠前者深为1.20 m，上下宽度分别为1.5 m和0.5 m，后者深为1.00 m，上下部宽为4 m和2.8 m。此外，研究表明，进水浓度对沟渠氮磷去除率也有不同程度的影响<sup>[12]</sup>。因此，加强对同一条件下、不同规格生态沟渠处理效率的研究和评价，能为生态沟渠在农业面源污染控制上的应用提供技术支持。本研究在进水浓度一致、表面水力负荷相同条件下，比较研究了三种不同规格生态沟渠对农业面源中主要污染物的去除效果，研究结果表明，在动态条件下，三种规格生态沟渠对污染物的去除效果均较好， $E_{0.80}$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP和SS的平均去除率分别为61.4%、58.7%、64.0%和58.5%； $E_{1.05}$ 分别为54.7%、62.5%、70.2%和51.1%； $E_{1.30}$ 的平均去除效率与前两种规格相比较，分别达到64.8%、63.1%、71.8%和60.8%。

生态沟渠作为一种特殊的湿地系统，对氮的去除主要是通过微生物的氨化、硝化与反硝化途径<sup>[16]</sup>；此外，污染负荷、水力负荷和水力停留时间等也会影响生态沟渠的出水水质，污染负荷和水力负荷越小，水力停留时间越长，则出水水质越好<sup>[17]</sup>。在本研究中， $E_{1.30}$ 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率均相对较高，其出水浓度也较为稳定，与其他两种规格生态沟渠相比，在相同表面水力负荷下， $E_{1.30}$ 的水力停留时间较长（26.5 h，表1），这可能是其氮素去除率较高的原因之一<sup>[18]</sup>。而虽然水力停留时间较短， $E_{0.80}$ 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较 $E_{1.05}$ 高，

可能是由于植物等其他原因的影响，由于本文结果没有涉及植物的作用，故在此不做讨论。基质和底泥的吸附是生态沟渠中除磷的主要途径<sup>[19]</sup>。在本研究中， $E_{1.30}$ 和 $E_{1.05}$ 对TP的去除效率均相对较高，可能是相对于窄浅型生态沟渠，宽深型沟渠内的基质和底泥与水体接触面积更大，有利于其对磷的吸收。泥沙的截控固持能有效降低农田排水中的颗粒物浓度，也是控制农业面源污染的关键之一。在动态试验中，水力停留时间作为最直观的因素，揭示了生态沟渠对农田排水中颗粒物高效沉降的原因，它既是颗粒物的沉降时间，又是水体中污染物与植物、基质、底泥的接触时间<sup>[8]</sup>。在本研究中， $E_{1.30}$ 对水体SS的去除效率相对较高，可能是较长的水力停留时间降低了SS输出能力，促进了SS沉淀。而 $E_{0.80}$ 的SS去除效率较 $E_{1.05}$ 高，可能是该类型沟渠中植物的作用超过了停留时间的影响。总体而言，与其他两种规格生态沟渠相比， $E_{1.30}$ 较长的水力停留时间、与基质和底泥较大的接触面积和较强的耐冲击负荷能力，促进了污染物的去除，使得该规格生态沟渠对农田排水中污染物的处理能力较好。

从主要污染物沿生态沟渠长度的浓度变化可以看出，随着沟渠长度增加，污染物浓度逐渐降低，说明污染物在生态沟渠中的迁移具有规律性，这与余红兵等<sup>[14]</sup>的研究结果相似。也有学者对长沟渠的研究结果表明，在铺设盘培牧草的600 m沟渠中，各种污染物指标在靠近进水口处的300 m沟渠内降解速度较快，而在远离进水口处的后300 m沟渠内变化污染物变化幅度相对比较平缓<sup>[20]</sup>，说明沟渠前段对污染物的处理效果较好，后段由于污染物浓度已经较低，处理效果并不明显。本研究通过2阶多项式方程计算出在进水浓度较高情况下，出水TN、TP浓度达到地表水V类标准时，不同规格生态沟渠处理污染物的适宜长度，综合TN、TP的处理效果来看，处理TN所需沟渠长度与TP相比较长，但 $E_{1.30}$ 所需长度与 $E_{0.80}$ 和 $E_{1.05}$ 相比较短，为27.4 m，而 $E_{0.80}$ 和 $E_{1.05}$ 分别为54.5 m和60.8 m； $E_{1.30}$ 处理TP所需沟渠长度也最短（4.9 m）。在长江中下游地区（如太湖流域）水网密布，农村经济发达，化肥施用量高，因此，在这一地区适宜利用生态沟渠来强化净化农业面源污染物，减轻水体污染负荷。本文研究的三种规格生态沟渠中，虽然 $E_{1.30}$ 边坡建设所需材料较多，但处理污染物所需长度最短，若按

27.4 m进行建造, 占地面积为28.8 m<sup>2</sup>; 而E<sub>0.80</sub>虽然本身占地面积小, 但处理污染物所需长度较长, 若按54.5 m进行建造, 则占地面积为43.6 m<sup>2</sup>。因此E<sub>1.30</sub>总占地面积少, 可以在一定程度上节约土地资源。从环境效益上看, 按照水稻每667 m<sup>2</sup>耗水1500 m<sup>3</sup>计算<sup>[21]</sup>, 建设E<sub>1.30</sub>生态沟渠工程从农田径流中减少污染物排放氮2.12 kg、磷0.20 kg (TN平均进水浓度2.24 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率63.1%; TP平均进水浓度0.19 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率71.8%), 可有效减少对周边水体环境的危害。本研究主要关注的是相同表面水力负荷下不同规格生态沟渠对排水中污染物的去除效果, 对于其脱氮除磷的内在机理及各去除途径的研究涉及较少, 且在1.30 m深的生态沟渠中, 如何在不增加规模的情况下, 通过改变沟渠线型空间结构(间隔设置小型跌水堰等)、间隔设置基质(沸石基质等)、优化植物配置(沟壁和沟底植物群落)等方式, 进一步提高生态沟渠处理效率、节约占地等, 还有待于进一步研究。

## 4 结 论

在相同表面水力负荷下, 三种深度规格生态沟渠对农业面源污染物均有较好的去除效果。与E<sub>0.80</sub>和E<sub>1.05</sub>相比, E<sub>1.30</sub>对农业面源污染物NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP和SS的去除效率均相对较高, 其出水浓度也较为稳定, 且耐冲击负荷能力相对较强。在进水浓度较高条件下, 出水TN、TP浓度达到地表水V类标准时, E<sub>1.30</sub>所需长度最短。综合而言来看, E<sub>1.30</sub>对农田排水中主要污染物的去除效率、耐冲击负荷能力最好, 在实践应用中应因地制宜根据需求应用或进一步提升该规格生态沟渠的设计, 以达到对农业面源污染控制的最大化。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术. 农业环境科学学报, 2013, 32 ( 1 ) : 1—8  
Yang L Z, Shi W M, Xue L H, et al. A reduce-retain-reuse-restore technology for controlling rural non-point pollution in China: eco-retain technology ( In Chinese ). Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32 ( 1 ) : 1—8
- [ 2 ] Liu F, Xiao R L, Wang Y, et al. Effect of a novel constructed drainage ditch on the phosphorus sorption capacity of ditch soils in an agricultural headwater catchment in subtropical central China. Ecological Engineering, 2013, 58: 69—76
- [ 3 ] 赵沛义, 妥德宝, 任永峰, 等. 作物残茬及不同生物篱的防风蚀效果研究. 水土保持学报, 2014, 28 ( 4 ) : 33—36  
Zhao P Y, Tuo D B, Ren Y F, et al. Effects of different crop stubble combined with biological fences on reducing soil wind erosion ( In Chinese ). Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 ( 4 ) : 33—36
- [ 4 ] Shan N, Ruan X H, Xu J, et al. Estimating the optimal width of buffer strip for nonpoint source pollution control in the Three Gorges Reservoir Area, China. Ecological Modelling, 2014, 276: 51—63
- [ 5 ] Wu X, Wu H, Ye J. Purification effects of two eco-ditch systems on Chinese soft-shelled turtle greenhouse culture wastewater pollution. Environmental Science & Pollution Research, 2014, 21: 5610—5618
- [ 6 ] Kroger R, Cooper C M, Moore M T. A preliminary study of an alternative controlled drainage strategy in surface drainage ditches: Low-grade weirs. Agricultural Water Management, 2008, 95: 678—684
- [ 7 ] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果. 生态学杂志, 2005, 24 ( 11 ) : 1371—1374  
Yang L Z, Zhou X P, Wang J G, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution ( In Chinese ). Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 ( 11 ) : 1371—1374
- [ 8 ] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探. 生态与农村环境学报, 2010, 26 ( 6 ) : 586—590  
Wang Y, Wang J G, Li W, et al. Initial exploration of mechanism of ecological ditch intercepting nitrogen and phosphorus in drainage from farmland ( In Chinese ). Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26 ( 6 ) : 586—590
- [ 9 ] 孙海军, 吴家森, 姜培坤, 等. 浙北山区典型小流域农村面源污染现状调查与治理对策. 中国农学通报, 2011, 27 ( 20 ) : 258—264  
Sun H J, Wu J S, Jiang P K, et al. A survey about rural non-point pollution in mountain region of northern Zhejiang Province and the countermeasures ( In Chinese ). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 ( 20 ) : 258—264
- [ 10 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4版. 北



- 京: 中国环境科学出版社, 2002: 84—524  
 Satate Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater (In Chinese). 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 84—524
- [ 11 ] Meers E, Tack F M G, Tolpe I, et al. Application of a full-scale constructed wetland for tertiary treatment of piggery manure: Monitoring results. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2008, 193: 15—24
- [ 12 ] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 三种类型农田排水沟渠氮磷拦截效果比较. *土壤*, 2009, 41 ( 6 ): 902—906  
 Wang Y, Wang J G, Li W, et al. Comparison on removal of nitrogen and phosphorus form hibernal farmland drainage by three kinds of ditches (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 ( 6 ): 902—906
- [ 13 ] 田上, 沙之敏, 岳玉波, 等. 不同类型沟渠对农田氮磷流失的拦截效果. *江苏农业科学*, 2016, 44 ( 4 ): 361—365  
 Tian S, Sha Z M, Yue Y B, et al. Interception effect of different types of ditches on agricultural nitrogen and phosphorus runoff (In Chinese). *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44 ( 4 ): 361—365
- [ 14 ] 余红兵, 肖润林, 杨建建, 等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23 ( 5 ): 686—692  
 Yu H B, Xiao R L, Yang Z J, et al. Study on the characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through ecological ditch during irrigation and rainfall (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23 ( 5 ): 686—692
- [ 15 ] 王沛芳, 王超, 胡颖. 氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规律研究. *水利学报*, 2007, 38 ( 9 ): 1135—1139  
 Wang P F, Wang C, Hu Y. Nitrogen degradation efficiency in channels with different ecological characteristics (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38 ( 9 ): 1135—1139
- [ 16 ] 吕涛, 吴树彪, 柳明慧, 等. 潮汐流及水平潜流人工湿地污水处理效果比较研究. *农业环境科学学报*, 2013, 32 ( 8 ): 1618—1624  
 Lü T, Wu S B, Liu M H, et al. Comparison of purification performance in tidal flow and horizontal subsurface flow constructed wetlands (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 ( 8 ): 1618—1624
- [ 17 ] Sim C H, Yusoff M K, Shutes B, et al. Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya City, Malaysia. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88 ( 2 ): 307—317
- [ 18 ] 王迪, 李红芳, 刘锋, 等. 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究. *环境科学*, 2016, 37 ( 5 ): 1717—1723  
 Wang D, Li H F, Liu F, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China (In Chinese). *Environmental Science*, 2016, 37 ( 5 ): 1717—1723
- [ 19 ] Wang C H, Pei Y S. Effects of light, microbial activity, and sediment resuspension on the phosphorus immobilization capability of drinking water treatment residuals in lake sediment. *Environmental Science & Pollution Research*, 2013, 20 ( 12 ): 8000—8009
- [ 20 ] 陈海生, 宋仿根, 刘建飞, 等. 生态沟渠中盘培牧草对养猪场废水降污效果研究. *江西农业学报*, 2010, 22 ( 8 ): 152—155  
 Chen H S, Song F G, Liu J F, et al. Study on effects of pasture strips in ecological ditch on degradation of pollutants in piggery wastewater (In Chinese). *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22 ( 8 ): 152—155
- [ 21 ] 陈重军, 王建芳, 凌士平, 等. 农田面源污染生态沟渠生态净化效能评估. *江苏农业科学*, 2015, 43 ( 11 ): 472—474  
 Chen C J, Wang J F, Ling S P, et al. Ecological purification efficiency assess of ecological ditch for agricultural non-point source pollution (In Chinese). *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 ( 11 ): 472—474

## Comparative Research on Effects of Ecological Ditches Different in Specification Treating Pollutants in Drainage

LIU Fuxing<sup>1,2</sup> WANG Junli<sup>1,2</sup> FU Zishi<sup>1,2†</sup>

( 1 Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, China )

( 2 Shanghai Engineering Research Centre of Low-carbon Agriculture, Shanghai 201415, China )

**Abstract** 【Objective】With rapid development of the socioeconomy and agriculture of China, the

use of chemical fertilizers and pesticides is growing excessive in total amount and rate. As a result, non-point source (NPS) pollution emerges with pollutants flowing into water environments with surface runoff and drainage and via other channels. According to the “Bulletin of the First National Survey of Pollution Sources in China” published by Ministry of Environmental Protection of China in 2010, agricultural NPS pollution contributed up to 57.2% and 67.4% to the total discharge of N and P in the country, respectively. Ecological ditches, as a special kind of wetland systems, can be used to manage agricultural NPS pollution with balanced ecological and environmental benefits. In order to understand how ecological ditches, different in depth ( $E_{0.80}$ ,  $E_{1.05}$  and  $E_{1.30}$ ), can reduce main NPS pollutants under the same hydraulic surface loading ( $0.60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), it is essential to evaluate pollutant removal efficiency and anti-shock loading capacity of the ditches. 【Method】 For this study, an experiment was conducted at the Zhuanghang Experimental Station ( $121^\circ 23' \text{E}$ ,  $30^\circ 53' \text{N}$ ) of the Shanghai Academy of Agricultural Science, China. The experiment had three eco-ditches, the same in length (90 m) but different in depth (0.80 m, 1.05 m and 1.30 m). Aquatic evergreen species, *Vallisneria natans*, was grown in all the three eco-ditches, the same in density. Simulated agricultural NPS pollution water was diverted from a river and spiked with a certain amount of urea and  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  till it was the same in N and P content as that in the effluent of local farmlands. And then it was introduced into the eco-ditch systems dynamically. Before the experiment, the eco-ditch systems were stabilized for a period of time before the experiment began, and the experiment period lasted 20 d. The inflow TN and TP concentrations were  $0.86 \sim 6.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.11 \sim 0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. 【Result】 Results showed that under the dynamic conditions of the experiment, all the three ecological ditches were all quite high in NPS pollutants removal efficiency, regardless of the difference in depth. The mean ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and suspended substance (SS) removal rate of Ditch  $E_{0.80}$  was 61.4%, 58.7%, 64.0% and 58.5%, respectively, of Ditch  $E_{1.05}$ , 54.7%, 62.5%, 70.2% and 51.1%, respectively, and of Ditch  $E_{1.30}$ , 64.8%, 63.1%, 71.8% and 60.8%, respectively, throughout the entire experiment time. Obviously, Ditch  $E_{1.30}$  was the highest in pollutant removal efficiency. With the same inflows the same in pollutant concentration, the average TN and TP concentration in the effluent measured at the point of 22.5 m and 45 m down the ditch was the lowest in Ditch  $E_{1.30}$  and the average TN and TP concentration was reduced down to  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  at the point of 27.4 m and 4.9 m, respectively, down the ditch, in Ditch  $E_{1.30}$ . The course was much shorter in Ditch  $E_{1.30}$ , then in Ditch  $E_{0.80}$ . For the latter it was 54.5 m and 9.8 m, respectively. Meanwhile, the concentrations of pollutants in the effluent from Ditch  $E_{1.30}$  were relatively stable, indicating that Ditch  $E_{1.30}$  was the highest in anti-shock loading capacity. 【Conclusion】 Compared with Ditch  $E_{0.80}$  and Ditch  $E_{1.05}$ , Ditch  $E_{1.30}$  is obviously higher in pollutant removal efficiency and anti-shock loading capacity, when they are used to manage agricultural NPS pollution. So it is recommended that in practice, ditches 1.30 m in depth should be built site-specifically. This research is expected to be of great practical guiding significance to control of agricultural non-point source NPS pollution. However, more researches should be done on further improvement of pollutant handling efficiency of the ecological ditches and on land-saving as well by altering the linear spatial structure, setting up drop dams at intervals, laying down beds of substrates (like zeolite, etc.) at intervals and optimizing plant configuration (keeping plants growing at the bottom and on the walls of the ditches).

**Key words** Ecological ditch; Removal efficiency; Agricultural non-point source pollution; Hydraulic surface loading; Nitrogen; Phosphorus

(责任编辑: 卢萍)