

小流域降水径流沟渠中氮磷的流失特征与生态拦截效应

何洋^{1,2}, 余红兵^{3*}, 杨知建⁴, 肖润林¹

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.湖南城市学院建筑与城市规划学院, 湖南 益阳 413000; 4.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为研究降水径流过程中非点源污染物氮、磷浓度的变化特征, 分析降水作用下长沙县金井河小流域农业源头沟渠水中氮、磷的流失特征与生态拦截效应。结果表明: 在降水初期非点源污染物氮、磷浓度与降水径流量的变化均呈逐渐递增趋势, 雨后均呈递减变化; 降水作用下沟渠系统总氮输出的最大值为 4.67 mg/L, 总磷输出的最大值为 0.38 mg/L, 其氮素输出的主要形态为氨态氮和硝态氮; 雨后各断面氮、磷的输出随着时间的增加呈先增加后降低的趋势, 其中总氮与总磷含量分别在雨后第 3 天和第 2 天达到最高; 菖蒲-茭白段的生态拦截效果明显高于自然段的自然净化效果, 表明植物拦截和吸收是植被段氮、磷去除的重要途径, 菖蒲、茭白在 6 月吸收氮、磷分别达 26.90、2.34 g/m²。

关键词: 降水径流; 氮流失; 磷流失; 沟渠; 生态拦截; 非点源污染; 长沙县金井河

中图分类号: S157.1; X592

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2016)04-0398-05

Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in ditches and effects of ecological interception by rainfall runoff in a small red soil watershed

He Yang^{1,2}, Yu Hongbing^{3*}, Yang Zhijian⁴, Xiao Runlin¹

(1. Institute of Subtropical Agriculture and Ecology Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China; 4. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: An agricultural ditch in headwater of Jinjin River, located at a small watershed in Changsha county, was selected as the study area, changes and losses of nitrogen, phosphorus in ditches and effects of ecological interception from rainfall runoff were analyzed. The results showed that the pollutants concentration and rainfall runoff increased gradually at their highest in preliminary stage of rainfall, however, they decreased gradually after the rainfall. The highest total nitrogen and total phosphorus content reached up to 4.67 mg/L and 0.38 mg/L during raining time respectively, ammonium and nitrate were the predominant forms. The transportation content of total nitrogen and total phosphorus increased at first, and then declined by time, the total nitrogen and total phosphorus content appeared to their maximum at the third days and the second days after the rainfall respectively, and they gradually decreased by time. The ecological interception capacity in ditches of *Acorus calamus* L. and *Zizania latifolia* was obviously higher than that of natural purification sections, which indicated that plant interception and assimilation were vital to decrease the nitrogen and phosphorus. The total assimilated nitrogen and phosphorus amounts were 26.90 and 2.34 g/m² respectively during the rainy season (between April and June) in ditches. The results could provide references for agricultural non point pollution control at river basin scale.

Keywords: rainfall runoff; nitrogen losses; phosphorus losses; ditch; ecological interception; non point source pollution; Jinjin river in Changsha county

农田排水沟渠作为农田生态系统的重要组成部分,既具备排水功能,又具备湿地功效,是农业非点源污染物的最初汇聚地和湖泊、河道营养盐等的输出源,是目前农业非点源污染防治研究的热点^[1-2]。农田排水沟渠系统不太稳定,在降水或灌溉等产流作用下,氮、磷污染物大量流失,形成农业非点源污染,并引起水体富营养化^[3-4]。目前,国内外许多学者就农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化规律和在降雨径流中控制的重要作用机制、沟渠湿地底泥和水质的空间变化、湿地营养物拦截的机理、面源污染的模型及参数等进行了研究^[5-11]。掌握主要污染源氮、磷在径流过程中的浓度变化规律^[12-14]对正确评估农田沟渠径流水环境污染具有重要作用^[15]。笔者研究湖南亚热带红壤小流域丘陵区脱甲坝沟渠内氮、磷含量随沟渠降水径流的变化特征和总氮、总磷在降水后的迁移变化特征,旨在为湘江流域水污染综合治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验区位于亚热带红壤小流域金井河流域(113°18'E 至 113°26'E, 28°30'N 至 28°39'N)。金井河是长江流域湘江支流捞刀河的支流,属于中亚热带南缘季风气候。试验前,沟渠中从上游到下游依次种植了多年生挺水型水生植物菖蒲(*Acorus calamus* L.)和茭白(*Zizania latifolia*)。沟渠呈“U”形,边坡长满杂草。2011 年降水主要集中在 4—6 月(降水量占全年降水量的 55%)。周边耕作植物主要为水稻和西瓜。整个试验区与外界的水体交换都通过沟渠系统进行。

1.2 方法

试验于 2011 年进行。

降水过程观测:在降水过程中于脱甲坝沟渠总出水口处(茭白下游)采样,测定水样中的总氮、氨态氮、硝态氮和总磷的浓度。在沟渠总出水口处设置矩形堰,并在旁边设置流量计,实时记录流量,观测脱甲坝沟渠的径流量。

雨后断面观测:试验沟渠段地势平坦,水流平稳,全程 800 m(平均宽度为 1.5 m,深 0.36 m)。沿水流方向自上而下分成 4 种沟渠段(每段 200 m),分别为自然段 1、自然段 2、菖蒲段、茭白段,总

共设置 5 个取样断面,即断面 1 为自然段 1 的上端,断面 5 为茭白段的下端。

用如下公式分析菖蒲—茭白植物段拦截氮、磷的效果与自然段对氮、磷的净化能力。

$$R_1 = \frac{(C_{断面1} - C_{断面2})}{C_{断面1}}; R_2 = \frac{(C_{断面2} - C_{断面3})}{C_{断面2}}; R_3 = \frac{(C_{断面3} - C_{断面4})}{C_{断面3}}; R_4 = \frac{(C_{断面4} - C_{断面5})}{C_{断面4}}; R_{自然段} = R_1 + R_2; R_{植物段} = R_3 + R_4。式中:$$

R_1 为自然段 1 净化水体氮或磷的能力: $C_{断面1}$ 为自然段 1 的上端水样氮、磷浓度(mg/L); $C_{断面2}$ 为自然段 1 的下端水样氮、磷浓度(mg/L); R_2 为自然段 2 净化水体氮或磷的能力; $C_{断面3}$ 为自然段 2 下端或菖蒲段上端水样氮、磷浓度(mg/L); R_3 为菖蒲段拦截水体氮或磷的能力: $C_{断面4}$ 为菖蒲段下端或茭白段上端水样氮、磷浓度(mg/L); R_4 为茭白段拦截水体氮或磷的能力: $C_{断面5}$ 为茭白段下端水样氮、磷浓度(mg/L)。

$R_{自然段}$ 为自然段 1 和自然段 2 净化水体氮或磷的能力; $R_{植物段}$ 为菖蒲段和茭白段拦截水体中氮或磷的能力。

1.3 样品采集与分析方法

降水过程采样:降水时间如果在 1 h 内,每隔 15 min 采样 1 次(因采样时降水时间未知,先按每 15 min 采样 1 次进行采样);降水时间如果超过 1 h,每隔 30 min 采样 1 次,然后每隔 1 h 采样 1 次,到水位回复到降水前位置时停止采样。水样总氮用碱性过硫酸钾消化,然后用流动分析仪测定,氨态氮、硝态氮用流动分析仪测定;总磷用过硫酸钾消解,用钼锑抗分光光度法测定^[16]。

雨后断面采样:在降水后连续 5 d 内对各断面进行采样。每个断面用 200 mL 标准采样瓶取样,样品在 4℃ 下保存。各断面的氮、磷含量均取连续 5 d 样品的平均值。

植物采样:试验期内(6 月)采集植物样,在各植物段分别选取植物生长较均匀的样方 1 m×1 m,用收获法采集地上部分样品。用挖掘法采集地下部分样品。取样时将样方内茎叶齐地收割,并将根状茎与须根全部挖出,将样品带回实验室用水清洗。所有样品于 105℃ 杀青 2 h, 80℃ 烘干至恒重,计算生物量。将烘干的植物样用搅碎机碾磨,装入自封袋以备检测。各植物样品先用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化后,用流动分析仪测全氮含量,用钼锑抗比色法测全磷含量^[17]。

2 结果与分析

2.1 沟渠中氮、磷浓度随流量的变化特征

以监测6月17日(12:20开始下雨)的一场降水过程为例。由表1可见,沟渠出口处降水过程中产生水流量的变化趋势与污染物氮、磷浓度的变化趋势大致相同。降水初期,随着流量和水位的增加,污染物氮、

磷浓度呈逐渐递增趋势;在雨停后,随着流量的减小,氮、磷浓度也有小幅度的变化,但变幅较稳定,总体上呈递减趋势。在监测时段内,氮、磷污染物浓度峰值的出现时间比流量峰值略有提前,总体比较一致,比水位峰值的出现时间略有滞后,其原因是所研究降水的历时长,降水特征差异大。

表 1 脱甲坝沟渠中的径流量和氮磷浓度

Table 1 Runoff and nitrogen and phosphorus contents in Tuoja ditch					
时间	径流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	总氮质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨态氮质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝态氮质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
12:35	946.80	2.940 0	1.437	1.131	0.130 0
13:05	1 270.70	3.212 5	1.499	1.159	0.076 2
13:50	1 580.70	4.665 0	2.393	1.537	0.266 8
14:35	1 591.70	4.640 0	1.433	1.433	0.333 6
15:05	1 600.10	4.265 0	2.074	1.340	0.247 4
15:35	1 462.90	3.705 0	1.842	1.308	0.235 0
16:05	1 387.40	3.632 5	1.527	1.600	0.192 6
16:35	1 330.90	3.407 5	1.414	1.213	0.175 0
17:05	1 310.20	3.477 5	1.335	1.210	0.182 8
18:40	1 229.80	3.280 0	1.899	1.377	0.172 4
19:30	1 231.60	2.880 0	1.260	1.327	0.170 4

由表1可见,脱甲坝沟渠总氮浓度变化较明显,降水前总氮质量浓度为2.76 mg/L,总氮最高质量浓度为4.67 mg/L,是降水前的1.69倍,且在降水后95 min(13:50)内达到峰值4.67 mg/L,较高总氮浓度维持时间约为75 min(13:50—15:05),此后总氮浓度慢慢回落到3.20~3.61 mg/L。降水开始前氨态氮含量为1.24 mg/L。降水过程中,氨态氮浓度达到峰值的时间与总氮浓度相同,即降水后95 min(13:50)内达到峰值2.39 mg/L,是降水前的1.94倍,此后氨态氮浓度降低至1.27~1.53 mg/L,渐趋于平缓。硝态氮浓度在降水过程中的变化幅度不大,由开始降水时的1.12 mg/L达到峰值1.54 mg/L后回落至开始值并趋于稳定。可见,在降水过程中,氨态氮浓度的变化规律与总氮浓度的变化规律基本一致,而硝态氮浓度的总体变化幅度不大。

由表1可知,在降水过程中,总磷浓度的变化幅度比较大,总磷质量浓度在140 min内由0.13 mg/L达到峰值0.38 mg/L,是降水前的3.04倍。总磷浓度远远超出了富营养化水体的判断标准(0.02 mg/L),表明沟渠水体已受到严重污染。

2.2 沟渠总氮总磷浓度随时间的变化特征

表1结果表明,总氮浓度在降水当天变化较明显,呈先增加后降低的变化趋势。图1结果表明,在雨后第3天总氮质量浓度达到最高(4.24 mg/L),随后逐渐降低至1.60~2.90 mg/L,可见,总氮浓度的变化在雨后第3天达到最高后下降,而不是呈单一的变化趋势。

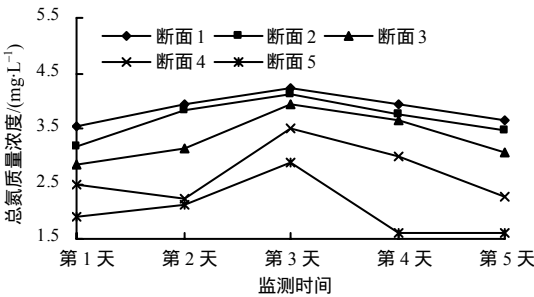


图 1 不同监测时间各断面的总氮质量浓度

Fig.1 Total nitrogen contents of different sections in different times

由图2可见,总磷浓度呈逐渐增加的趋势,在雨后第2天质量浓度达到最高(0.22 mg/L),然后下降,并趋于平缓(0.11~0.15 mg/L)。因总磷浓度在雨后第2天达到最大,所以,有效控制磷污染的最佳时间为雨后第2天。

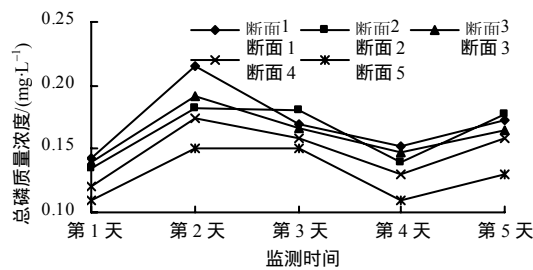


图 2 不同监测时间各断面的总磷质量浓度

Fig.2 Total phosphorus contents of different sections in different times

2.3 沟渠总氮、总磷沿程(断面)的变化特征

由图3可见,总氮浓度沿程(断面)基本呈逐渐递减的变化趋势。由图4可见,总磷浓度沿程也基本呈递减变化。

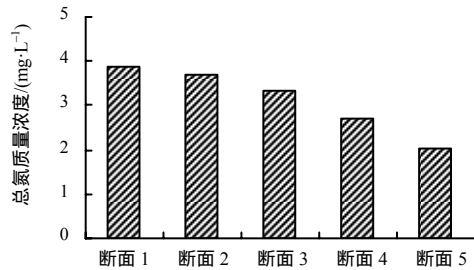


图 3 各断面的总氮浓度

Fig.3 Total nitrogen contents of different sections

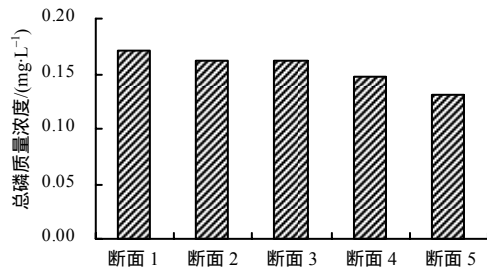


图 4 各断面的总磷浓度

Fig.4 Total phosphorus contents of different sections

总氮、总磷在沟渠中的迁移具有单一的变化规律,随着时间的推移,变化幅度有所变化:总氮初始质量浓度为3.54~4.24 mg/L,出口质量浓度为

1.60~2.11 mg/L,沟渠对总氮的截留率为31.60%~59.49%,说明农田排水沟渠系统对氮具有很好的截留作用;总磷初始质量浓度为0.14~0.22 mg/L,出口质量浓度为0.11~0.15 mg/L,说明农田排水沟渠系统对总磷有很好的截留作用,截留率为11.18%~30.56%。

2.4 沟渠植物对氮、磷的生态拦截效应

2.4.1 植物拦截

由对菖蒲-茭白植物段氮、磷的拦截效果与自然段氮、磷的净化能力分析结果可见,菖蒲-茭白段的生态拦截对沟渠水体净化发挥了重要作用:在菖蒲-茭白段中,全氮、全磷含量有明显降低,对全氮、全磷浓度的拦截效果分别为43.86%、20.67%。因沟渠水流的自然净化,自然段水中氮、磷浓度虽有一定降低,但其净化能力明显减弱,全氮、全磷的自然净化分别为14.37%、5.08%。从菖蒲-茭白段和自然段对水中氮、磷污染物的拦截效果看,菖蒲-茭白段拦截农业面源污染物中氮、磷的能力明显高于自然段的自然净化能力,表明农田排水沟渠本身对氮、磷污染物均有一定程度的拦截效应,而水生植物的存在增强了该拦截效应,即在沟渠中种植菖蒲、茭白用于拦截氮、磷污染物均可取得较好的效果。

2.4.2 植物吸收

菖蒲、茭白属于挺水植物,既可以通过根部从沟渠底泥中吸取氮、磷,降低底泥中氮、磷的含量,也可以通过茎叶吸收氮、磷。由表2可见,6月菖蒲根对氮、磷的吸收分别为3.96、0.37 g/m²,菖蒲茎叶对氮、磷的吸收分别为5.5、0.58 g/m²;茭白根对氮、磷的吸收分别为4.40、0.49 g/m²,茭白茎叶对氮、磷的吸收分别为13.02、0.89 g/m²。

表 2 菖蒲和茭白在试验期内(6 月)的氮、磷吸收量和生物量

Table 2 Assimilation of nitrogen and phosphorus and the biomass of <i>Acorus calamus</i> L. and <i>Zizania latifolia</i> in June					
植物部位	氮质量浓度/(g·kg ⁻¹)	氮吸收量/(g·m ⁻²)	磷质量浓度/(g·kg ⁻¹)	磷吸收量/(g·m ⁻²)	生物量/(kg·m ⁻²)
菖蒲根	20.82	3.96	1.96	0.37	0.19
菖蒲茎叶	21.25	5.50	2.24	0.58	0.26
茭白根	14.65	4.40	1.63	0.49	0.30
茭白茎叶	26.58	13.02	1.82	0.89	0.49

从本研究中的氮、磷吸收量看,植被吸收是植被段氮、磷去除的重要途径,植被段植物6月可吸收氮、磷分别达26.90、2.34 g/m²。沟渠中的水生植物

不仅可以促进氮、磷的迁移,而且也可以通过自身吸收作用截留一部分污染物,因此,沟渠中种植挺水植物菖蒲、茭白可作为沟渠水体修复的重要途径。

3 结论与讨论

降水时产生的降水径流排入沟渠会对沟渠造成氮、磷污染,降水径流量的变化趋势与污染物氮、磷浓度的变化趋势大致相同,降水过程中总氮浓度呈现先增加后降低的趋势,这是由降水初期氮素在沟渠中的转化主要受沉积作用影响所致,降雨径流在短时间内的汇入使得大量颗粒态氮在迁移过程中与被冲刷流失的泥土等结合而沉积下来,氮的各项转化受到影响。与总氮相比,总磷浓度也出现先增加后降低的趋势,这是由磷在农田排水沟渠系统中的迁移转化主要是受吸附作用的影响所致,降水产生的降水径流开始时有较大的汇入,加上沟渠系统的不稳定性,使磷在沟渠系统中的转化作用不明显,使磷浓度增加,随着底泥和水中颗粒物对磷的吸附量逐渐增加,导致总磷浓度下降。

沟渠各断面总氮、总磷浓度的最高值分别出现在雨后第3天和第2天,所以,为有效控制雨后总氮、总磷的流失,可在降水后第3天和第2天控制总氮、总磷的排放。

植物对营养物质的吸收是净化的主要途径^[18]。沟渠对氮、磷具有一定截留效应,沟渠中植物的拦截和吸收均可有效控制降水径流氮、磷污染,合理依靠植物的作用来降低水中氮、磷含量可取得较好的效果。

参考文献:

- [1] 姜翠玲,崔广柏,范晓秋,等.沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J].环境科学,2004,25(2):125-128.
- [2] 何军,崔远来,吕露,等.沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮、磷污染的去除试验[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1872-1879.
- [3] Dukes M D, Evans R O. Impact of agriculture on water quality in the North Carolina Middle Coastal Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, 2006(3): 250-262.
- [4] Bechmann M, Stålnacke P, Kværnø S, et al. Integrated tool for risk assessment in agricultural management of soil erosion and losses of phosphorus and nitrogen[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(2): 749-759.
- [5] 李强坤,胡亚伟,孙娟.农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J].中国生态农业学报,2010,18(1):210-214.
- [6] 罗专溪,朱波,唐家良,等.自然沟渠控制村镇降水径流中氮、磷污染的主要作用机制[J].环境科学学报,2009,29(3):561-568.
- [7] 徐红灯,王京刚,席北斗,等.降水径流时农田沟渠水体中氮、磷迁移转化规律研究[J].环境污染与防治,2007,29(1):18-21.
- [8] 王晓玲,涂佳敏,李松敏,等.稻田沟渠施肥后降水径流中氮素迁移规律研究[J].水利学报,2014,45(9):1075-1081.
- [9] David V C, Peter J S. Spatial and temporal variations of water quality in drainage ditches within vegetable farms and citrus groves[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65: 39-57.
- [10] Eileen C, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural non-point source pollution mode[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295: 211-224.
- [11] Bonaiti G, Borin M. Efficiency of controlled drainage and subirrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2): 343-352.
- [12] 魏林宏,张斌,程训强.水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J].水利学报,2007,38(9):1145-1150.
- [13] Van Herpe Y, Troch P A. Spatial and temporal variations in surface water nitrate concentrations in a mixed land use catchment under humid temperate climatic conditions[J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 2439-2455.
- [14] 于会彬,席北斗,郭旭晶,等.降水对农田排水沟渠中氮、磷流失的影响[J].环境科学研究,2009,22(4):409-414.
- [15] 马永生,张淑英,邓兰萍.氮、磷在农田沟渠湿地系统中的迁移转化机理及其模型研究进展[J].甘肃科技,2005,21(2):106-107.
- [16] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [18] 杨小林,朱波,董玉龙,等.紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J].水利学报,2013,44(3):276-283.

责任编辑:王赛群
英文编辑:王 库