

罗专溪, 朱波, 唐家良, 等. 2009. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制 [J]. 环境科学学报, 29(3): 561-568
Luo Z X, Zhu B, Tang J L, et al. 2009. Primary mechanisms of nitrogen and phosphorus removal from stormwater runoff by a natural ditch in a rural township [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(3): 561-568

自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制

罗专溪^{1,2}, 朱波^{1,*}, 唐家良¹, 汪涛¹, 张剑¹, 王振华¹

1 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041
2 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

收稿日期: 2008-06-14 修回日期: 2008-08-05 录用日期: 2009-02-02

摘要: 以四川盆地紫色丘陵区林山村镇为例, 分析降雨径流过程中氮磷在自然沟渠内的空间变化特征和不同控制机制的净化能力, 研究了自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷的主要作用机制. 研究表明, 除 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在沿程上呈先减后增而后再减的趋势外, 其它氮磷污染物 (TN, PN, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, TP, PP 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$) 均为沿程递减趋势. 溶解态氮是降雨径流氮素在空间沿程上的主要迁移形态, 溶解态磷是流量限制型事件降雨径流磷素空间沿程的主要迁移形态, 而颗粒态磷是物质限制型事件降雨径流磷素空间沿程的主要迁移形态. 泥沙截固持是自然沟渠控制降雨径流氮磷污染的主要作用机制, 有效降低径流中颗粒物浓度和拦截泥沙是控制降雨径流氮磷污染的关键. 沉降段和沉沙凼具有明显的泥沙及颗粒态氮磷截固持作用, 可较好地去除村镇降雨径流中的氮磷颗粒态污染物, 平均氮磷去除量分别为 144.51 、 65.20 g m^{-2} (平均雨量 37.85 mm). 植物吸收是植被段氮磷去除的重要途径, 在雨季共吸收氮磷分别可达 82.69 、 12.52 g m^{-2} . 跌落曝氧也是降雨径流氮磷污染控制的重要作用机制, 跌落段对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的平均去除负荷为 15.05 g m^{-2} .

关键词: 迁移; 降雨径流; 面源污染; 村镇

文章编号: 0253-2468(2009)03-561-08 中图分类号: X522 文献标识码: A

Primary mechanisms of nitrogen and phosphorus removal from stormwater runoff by a natural ditch in a rural township

LUO Zhuaxi^{1,2}, ZHU Bo^{1,*}, TANG Jialiang¹, WANG Tao¹, ZHANG Jian¹, WANG Zhenhua¹

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041
2 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021

Received 14 June 2008 received in revised form 5 August 2008 accepted 2 February 2009

Abstract To reveal the main nitrogen and phosphorus removal mechanisms of a natural ditch in a rural township, experiments were conducted in Linshan Township (area of 2.32 km^2) in the hilly area of Sichuan basin, China. The spatial variance of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff and the purification capacity of nitrogen and phosphorus at different control sections of the natural ditch were examined from June 2006 to July 2007. The results showed that concentrations of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (Nitrate) tended to decrease first before a flush, then decrease with increasing distance downstream, while concentrations of other pollutants such as TN (Total Nitrogen), PN (Particulate nitrogen), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (Ammonia nitrogen), TP (Total phosphorus), PP (Particulate phosphorus), and $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ (Phosphate) reduced with increasing distance downstream. DN (Dissolved nitrogen) was the primary transport form of nitrogen with increasing distance downstream in all events. DP (Dissolved phosphorus) was the primary transport form of phosphorus with increasing distance downstream during flow-limited events, while PP was the primary form during mass-limited events. Sediment retention and immobilization was the most important mechanism for removing nitrogen and phosphorus from stormwater runoff in the natural ditch. The key to remove nitrogen and phosphorus pollution in stormwater runoff was to reduce the concentrations of particulate forms effectively. For each event with an average of 37.85 mm of precipitation, the nitrogen and phosphorus removal capacities averaged 144.51 g m^{-2} and 65.20 g m^{-2} by sediment retention and immobilization in the GS (Grit removal segment) and the GT (Grit removal tank). Plant assimilation was the other pivotal mechanism for removing

基金项目: 中国科学院西部行动项目 (No. KZCX2-XB2-07-02); 国家自然科学基金 (No. 40571093); 山地所创新前沿项目

Supported by the Western Development Plan of CAS (No. KZCX2-XB2-07-02), the National Natural Science Foundation of China (No. 40571093) and the Innovation Program of MHE

作者简介: 罗专溪 (1979-), 男, 博士, E-mail: zluo@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: LUO Zhuaxi (1979-), male, Ph.D., E-mail: zluo@163.com; * Corresponding author

nitrogen and phosphorus in stormwater runoff in the natural segment (NS), the total assimilated nitrogen and phosphorus amounts were 82.69 g m^{-2} and 12.52 g m^{-2} during the rainy season in the natural ditch. Aeration in a waterfall was another pivotal mechanism. However, the nitrification ability in the falling segment was low as the average removal load for NH_4^+-N was 15.05 g m^{-2} .

Keywords transport; stormwater runoff; non-point pollution; rural township

1 引言 (Introduction)

自然沟渠作为面源污染源与水体之间的缓冲过渡区,能够通过其中的土壤吸附、植物吸收、生物降解等一系列自然净化机制,降低进入河流等地表水中的氮、磷污染物的含量.近年来,诸多学者针对自然沟渠截留净化污染物的研究主要集中在农田排水沟渠 (Haggard *et al.*, 1999; Bruce *et al.*, 2001; David *et al.*, 2000; 姜翠玲等, 2004a; Smith *et al.*, 2006; 徐红灯, 2007),对农业非点源污染在自然沟渠的迁移转化机理做了深入的探讨;研究结果表明,沉积物吸持、植物吸收、微生物降解等是截留净化的主要作用机理 (Haggard *et al.*, 1999; Smith *et al.*, 2006; 姜翠玲等, 2004a; 徐红灯, 2007).了解面源污染物在自然沟渠的迁移转化特征、截留净化效应和作用机理,是优化控制农业非点源污染的基础.村镇等处的自然沟渠是降雨径流输移的必经廊道,通过沟渠自身的泥沙固持、植物吸收等自然净化机制,可达到截留污染的目的.但是,村镇降雨径流污染在自然沟渠的迁移转化、截留净化机理与效应的研究甚是缺乏,难以为因地制宜、注重实效、经济低廉的控制面源污染提供科学基础.

紫色土是亚热带湿润季风气候条件下,由紫色砂页岩发育而成的岩性土,广泛分布在长江上游的低山丘陵区,集中分布在四川盆地丘陵区(紫色丘陵区).紫色丘陵区处于长江上游生态屏障的最前沿,是长江流域、三峡水库水环境的重要影响区.紫色丘陵区是传统农区,农村人口众多,村镇发展快速,村镇生产、生活废水因缺乏排污管道和处理系统而无序排放、随机累积,易在降雨径流驱动下产生流域中较高的污染负荷(罗专溪等, 2008; 朱波等, 2006).调查发现,在紫色丘陵区村镇降雨径流排放口和下游水体(如三峡水库)之间的自然沟渠,普遍存在随坡就势、沿多级阶地由高往低的跌落段,也有雨水径流日积月累长久冲刷出来的不规则坑、凼,还有水花生、水蓼等丰富茂盛植物的植被段,其景观特征独特.这些自然沟渠可通过泥沙截控固持径流中的养分,可通过植物吸收径流中的养

分,对村镇降雨径流氮磷污染具有一定的自净作用.因此,本研究考察紫色丘陵区村镇降雨径流中的氮磷在自然沟渠内的空间变异特征及其主要控制作用机制,旨在为有效防治村镇降雨径流污染提供理论依据.

2 研究方法 (Methods)

2.1 观测集水区概况

林山村镇集水区位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,地理位置: $105^{\circ}27'E$, $31^{\circ}16'N$,海拔 $400 \sim 600\text{m}$,面积约 2.32km^2 .林山村镇集水区土地利用性质和土壤属性参见罗专溪等(2008)一文.本区属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3°C ,多年平均降雨量 826mm .

2.2 野外观测

2.2.1 降雨径流观测 据自然景观特征,将自然沟渠(长 218m ,平均宽度为 0.5m ,深 0.6m),沿水流方向划分成4种渠段(图1),分别是沉降段(GS, Grit removal segment)、跌落段(FS, Falling segment)、沉沙凼(GT, Grit removal tank)与植被段(NS, Natural segment),以便于观测.4种渠段依次串联而成密闭渠道系统.村镇降雨径流从集水区出口(CO)开始,依次流入沉降段、自然跌落段、沉沙凼和植被段(箭头方面表示过水方向),污染物得到净化(图1).

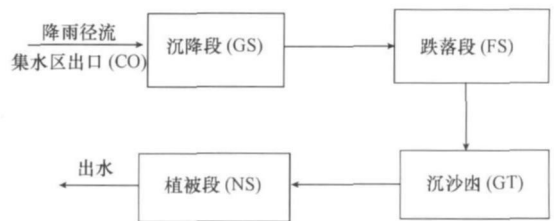


图1 自然沟渠降雨径流空间沿程示意图

Fig. 1 Sketch of stormwater runoff in the natural ditch in Linshan Township

沉降段(GS)全长 110m ,平均宽为 0.6m ,面积为 66m^2 ,因集水区出口下方及下游 85m 处分别有径流长期冲刷形成的沉沙凼2个而命名.2个沉沙凼面积分别约为 $2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$, $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1\text{m}$.2个沉沙凼间及第2沉沙凼下游 20m 的沟渠坡势平缓,底部及护岸材料均是早年砌铺的,难透水石条.

跌落段 (FS) 长 32m, 平均宽 0.6m, 垂直落差达 26.8m, 面积为 19.2m², 渠段内有水流冲击出露的天然岩石。跌落段后有日积月累冲刷而天然形成的坑, 即类似于沉沙函 (GT), 其底部为透水性极差的裸露岩石, 其大小约为 8m × 1.5m × 0.5m。植被段 (NS) 长 67m, 平均宽为 0.6m, 面积为 40.2m², 渠段内生长优势植物种为蓼科的水蓼 (*Polygonum hydropiper* L.) 和外来种的苋科水花生 (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.)), 2种植物都为季节性植物, 生长期基本在一年的雨季 (春季的 3月到秋季的 9月) (刁正俗, 1990)。

沿降雨径流水流方向在自然沟渠各渠段的入、出水口共设置 5个采样点, 分别为沉降段的入口处 (即村镇集水区出口) (CO)、沉降段出口 (GSO)、跌落段出口 (FSO)、沉沙函出口 (GTO)、植被段出口 (NSO) (表 1), 其中沉降段、跌落段、沉沙函的出口分别是下一渠段的入口。在 2006年 5月至 2007年 9月时间内, 对降雨径流过程进行水质、水量同步观测, 共观测 16次。降雨产流后即开始采样, 前 15min 每 3min 采样一次, 15~30min 时每 5min 采样一次, 30~60min 时每 10min 采样一次, 以后采样时间间隔视流量变化在 10~30min 内变化, 直至降雨产流结束。采样时同步记录径流流量和采样时间。

统一用秒表精确记录各次径流过程采样历时、采样时刻, 并记录采样时间内的流量。将采集桶内的水样混合均匀, 取 500mL 水样于聚乙烯瓶中, 并按顺序登记瓶号, 及时带回实验室量取准确采样体积, 贮存于 4℃ 冰箱中待测。

表 1 自然沟渠降雨径流水质采样点

Table 1 Sampling sites for runoff and water quality in the natural ditch

编号	采样点	名称	相对距离 ^a /m	相对高程 ^b /m
1	CO	集水区出口	0	33.3
2	GSO	沉降段出口	110	28.3
3	FSO	跌落段出口	142	1.7
4	GTO	沉沙函出口	151	0.5
5	NSO	植被段出口	218	0

注: ^a相对距离指离第 1个采样点的距离; ^b相对高程指以第 5个采样点为 0基点的相对高度。

2.2.2 泥沙截控固持观测 在降雨事件结束后, 即对沉降段、沉沙函进行泥沙清除, 记录相应的质量, 并对沉积泥沙分不同层次混合采样 2份。一份保存于 0℃ 冰箱中待提取泥沙吸附的氮磷污染物; 另一份自然通风晾干, 过 2mm 筛, 分析泥沙携带的全氮、

全磷。

2.2.3 沟渠植物生物量观测 每隔 2月采用样方 (1×0.5m²) 观测一次植被段的水蓼和水花生, 至当年的雨季结束时 (9月) 停止观测。记录所观测生物的生物量, 并作烘干、粉碎等预处理, 分析植被吸收的养分。观测时间从 2005年的 7月份月上旬开始, 共观测 4次。

2.3 样品测定

2.3.1 水化学分析 测定项目包括氨氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N)、可溶性总氮 (DN)、总氮 (TN)、可溶性磷酸盐 (PO₄³⁻-P)、可溶总磷 (DP)、总磷 (TP) 等。TN、TP 分别采用碱性过硫酸钾消化紫外分光光度法、过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法测定干法测定。DN、DP 采用 0.45μm 微孔滤膜过滤后测定, 方法同 TN、TP。颗粒态氮 (PN) 和颗粒态磷 (PP) 分别为 TN 与 DN、TP 与 DP 的差值。NH₄⁺-N 采用苯酚-次氯酸盐比色法测定, NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定, 而 PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法测定。所有测定方法按照标准方法进行 (APHA et al., 1995)。

2.3.2 泥沙与植物养分 分析项目包括全氮、全磷、土壤铵态氮、硝态氮。全氮采用半微量开氏法测定, 全磷采用氢氧化钠 (钼锑比色法测定 (刘光菘, 1996)。泥沙所吸附铵态氮、硝态氮以 KCl 溶液 (2mol L⁻¹) 为浸提液, 在 1:10 的水土比条件下振荡 1h 提取上清液, 最后按照水样中相应项目的检测方法测定 (刘光菘, 1996)。

2.4 数据分析与计算方法

2.4.1 数据类型划分 Sansabne and Cristina (2004) 依据降雨径流流量的大小, 将降雨事件划分成 2种事件类型, 分别为流量限制型事件 (Flow-limited events) 和物质限制型 (Mass-limited events) 事件, 以便于论述随机性和复杂性很高的城市降雨径流污染特征。流量限制型事件通常发生在降雨量较小的时候, 此类型事件径流中的污染物浓度较高, 而物质限制型事件通常发生在降雨量较大的时候, 此类型事件径流中的污染物浓度较低。本研究在观测与调查过程中发现, 试验区观测的 16场降雨事件根据降雨量的大小, 也可划分成 2种事件类型包括流量限制型事件 (降雨量 ≤ 15mm) 和物质限制型事件 (降雨量 > 15mm), 其降雨特征如表 2 所示。流量限制型事件的先前天晴时间较长, 平均达 14.67d 而物质限制型事件的先前天晴时间较短, 平

均仅有 3.47d 另外, 流量限制型事件的其它降雨特征 (如降雨量、产流时间) 均比物质限制型事件的小 (表 2). 本研究选取探讨的 7825、7716 事件, 分别是流量限制型事件、物质限制型的典型事件, 其降雨特征如表 3 所示.

表 2 两种不同事件类型的降雨特征

Table 2 Rainfall characteristics for 2 different event types in the natural ditch

事件类型	降雨量 /mm	产流时间 /min	先前天晴时间 /d
流量限制型事件 (n=9)	4.87	55.22	14.67
物质限制型事件 (n=7)	41.23	315.00	3.47

表 3 两个典型事件的降雨特征

Table 3 Rainfall characteristics for 2 typical events in the natural ditch

事件编号	时间	降雨量 /mm	产流时间 /min	先前天晴时间 /d	事件类型
7825	2007-8-25	3.7	45	3	流量限制型
7716	2007-7-16	111.7	530	14	物质限制型

2.4.2 数据计算与统计分析 采用事件平均浓度 (EMCs, Event Mean Concentrations) 来评价降雨径

流氮磷浓度的空间变异特征 (Sansalone and Buchbergerl 1997; Lee and Bang 2000). EMCs 为污染物总量与径流总量的比值, 可按式 (1) 计算:

$$EMCs = \frac{\sum_{T=0}^t C_T Q_T \Delta T}{\sum_{T=0}^t Q_T \Delta T} \quad (1)$$

式中, Q 为流量 ($m^3 \cdot m \cdot in^{-1}$); C 为浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); ΔT 为取样时间间隔 (min).

采用单样本 K-S 检验污染物的正态分布性. 均值比较采用 Duncan's post hoc 检验方法, 其 F 值显著统计水平为 $p < 0.05$. 数据统计分析与作图分别采用 SPSS11.5 和 Sigmaplot 8.0 软件进行.

3 结果 (Results)

3.1 降雨径流氮磷在自然沟渠的空间变异特征

3.1.1 氮的变异特征 图 2 是 2 个典型事件 7825 (流量限制型事件) 和 7716 (物质限制型事件) 氮素浓度在自然沟渠的空间沿程变化. 从图 2 可见, 2 个典型事件的 TN、PN、 NH_4^+-N 的浓度在空间上都呈现递减趋势, 而 $NO_3^- - N$ 浓度则都呈先减后增而再减的趋势.

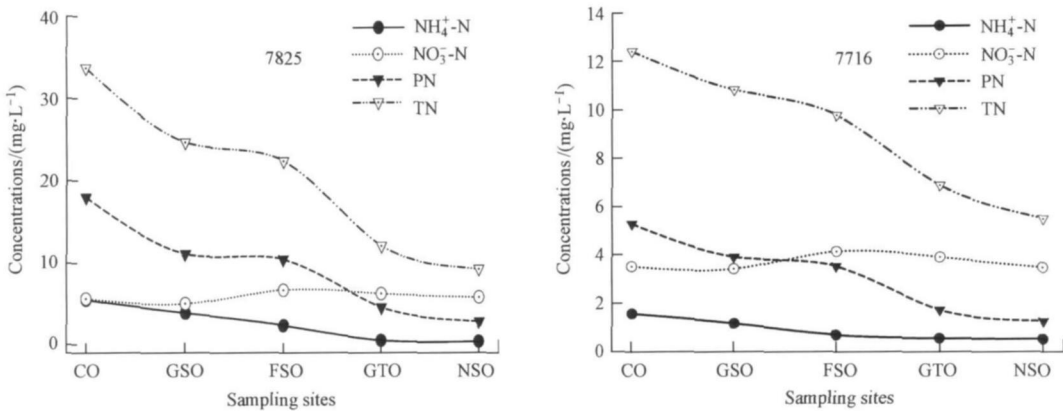


图 2 自然沟渠氮素浓度的空间变化 (7825 为流量限制型事件, 7716 为物质限制型事件)

Fig. 2 Spatial variance of nitrogen concentrations during two different rainfall events in the natural ditch (7825 event for Flow-limited event, 7716 event for Mass-limited event)

在 7825 流量限制型事件中, 沉降段出口 (GSO) 的 PN 浓度为 $11.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2), 占 TN 的百分比为 47.62%, 可见溶解态氮是沉降段迁移的主要形态. 沉降段出口与集水区出口 (CO) 比较, TN 减少的浓度为 $10.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2), PN 是沉降段氮素减少的主要形态 (PN 浓度减少了 $6.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 植被段 (NSO) 的 PN 浓度为 $2.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 TN 的百分比

为 30.28%, 可见 DN 是植被段的主要迁移形态; 植被段出口与沉沙函出口 (GTO) 比较, TN 减少的浓度为 $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PN 是植被段氮素减少的主要形态, 其减少浓度为 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中, 沉降段对 TN、PN 的截留净化量要高于植被段.

在 7716 物质限制型事件中, 沉降段出口的 PN 浓度为 $4.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占 TN 的百分比为 42.01%, 可

见溶解态氮同样是沉降段的主要形态. 沉降段出口与集水区出口比较, TN 减少的浓度为 2.90 mg L^{-1} (图 2), PN 同样是沉降段氮素减少的主要形态 (减少浓度达 1.81 mg L^{-1}). 植被段的 PN 浓度为 1.27 mg L^{-1} , 占 TN 百分比为 23.09%, 可见溶解态氮是植被段的主要迁移形态; 植被段出口与沉沙函出口比较, PN、TN 减少的浓度分别为 1.39 、 0.46 mg L^{-1} . 其中, 沉降段对 TN、PN 的截留净化量高于植被段.

在 7825 流量限制事件和 7716 物质限制型事件中, 跌落渠段的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度呈现增加趋势, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈减少趋势 (图 2), 说明跌落渠段具有促进氮从低价态向高价态转化的能力.

综上可知, 无论是流量限制型事件, 还是物质限制型事件, TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、PN 都呈现空间沿程递减规律, 溶解态氮是自然沟渠氮素的主要迁移形态, PN 是氮素的主要去除形态. PN 空间沿程上浓度减少最多的渠段为沉降段和沉沙函 (图 2). 2 种事件类型跌落渠段都呈现 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度呈现增加趋势, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈减少趋势.

3.1.2 磷的变异特征 图 3 是 2 个典型事件 7825 (流量限制型事件) 和 7716 (物质限制型事件) 磷素浓度在自然沟渠的空间沿程变化. 2 个不同事件类型的磷浓度都呈空间沿程递减规律.

在沉降段出口 (GSO), 7825 流量限制型事件的 TP、PP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的浓度分别为 2.81 、 1.18 、 0.82

mg L^{-1} , DP 浓度高于 PP, 是 TP 的主要迁移形态; 这是流量限制型事件的径流量较小, 沉降段对泥沙的截留和去除作用较好所致. 而 7716 物质限制型事件的对应浓度分别为 1.46 、 0.76 、 0.39 mg L^{-1} , PP 浓度略高于 DP, 是 TP 的主要迁移形态; 这主要是由于物质限制型事件的径流量较大, 沉降段泥沙沉降作用发挥稍弱所致.

同样, 在植被段 (NSO), 7825 流量限制型事件 TP、PP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的浓度分别为 0.37 、 0.18 、 0.07 mg L^{-1} , 而 7716 物质限制型事件对应浓度分别为 0.99 、 0.50 、 0.23 mg L^{-1} . 可见, 流量限制型事件中 DP 浓度略高于 PP, 是 TP 的主要迁移形态, 而物质限制型事件中 PP 浓度略高于 DP, 是 TP 的主要形态.

同时, 无论 7825 流量限制型事件, 还是 7716 物质限制型事件, 自然沟渠 PP 浓度的减少量都高于 TP 浓度减少量的一半 (图 3). 因而, 自然沟渠在 2 种事件类型中对 PP 的截留净化效应较好, 而对溶解态磷的截留净化效应稍弱. 从上可见, 流量限制型事件的磷空间沿程迁移形态以溶解态为主, 而物质限制型事件的磷空间沿程迁移形态以颗粒态为主. 自然沟渠降雨径流 TP、PP 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度呈现空间沿程一致减少趋势, PP 是自然沟渠磷的主要去除形态, 其浓度减少主要集中在沉降段和沉沙函.

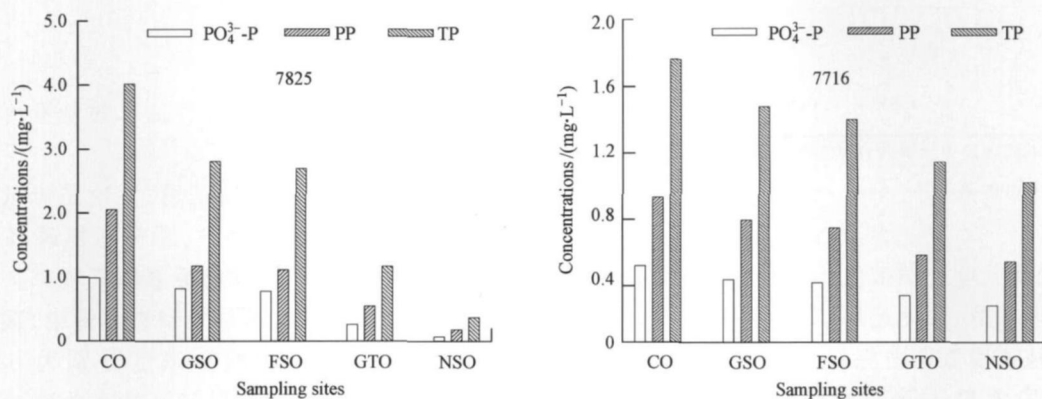


图 3 自然沟渠磷素浓度的空间变化 (7825 为流量限制型事件, 7716 为物质限制型事件)

Fig 3 Spatial variance of phosphorus concentrations during two different rainfall events in the natural ditch (7825 event for Flow-limited event, 7716 event for Mass-limited event)

3.2 自然沟渠不同作用机制对氮磷的净化能力

3.2.1 泥沙截控固持 表 4 是 2006 年 6 月至 2007 年 8 月观测的自然沟渠沉降段、沉沙函泥沙对氮磷

截控固持量的平均值. 从表 4 可知, 沉降段截控泥沙量 ($(690.66 \pm 359.11) \text{ kg}$) 略低于沉沙函泥沙截控量 ($(844.19 \pm 404.30) \text{ kg}$), 但全氮、全磷、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、

NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P含量都略高于沉沙函。因而, 沉降段截控泥沙平均可去除氮、磷分别为 72.78、37.95 g m^{-2} ; 稍高于沉沙函(氮磷去除量平均分别为 71.73、27.29 g m^{-2})。从上可见, 在平均降雨量为

37.85mm的多次观测平均水平上($n=5$), 自然沟渠通过沉降段与沉沙函的泥沙截控固持, 可去除氮、磷分别为 144.51、65.20 g m^{-2} 。

表 4 自然沟渠沉降段、沉沙函泥沙氮磷截控固持量(平均值, $n=5$)

Table 4 Nitrogen and phosphorus retention of the Grit removal Section (GS) and the Grit removal Tank (GT) during the observation period (2005.5~2007.9) (Mean, $n=5$) in the natural ditch

渠段	泥沙干重 /kg	全氮 /(mg kg^{-1})	全磷 /(mg kg^{-1})	NH_4^+ -N /(mg kg^{-1})	NO_3^- -N /(mg kg^{-1})	PO_4^{3-} -P /(mg kg^{-1})	降雨量 /mm
沉降段	690.66±359.11	442.42±46.14	233.77±206.19	3.74±1.39	1.70±0.26	0.54±0.46	37.85
沉沙函	844.19±404.30	358.75±72.14	137.34±166.66	1.56±0.80	0.79±0.24	0.39±0.13	

3.2.2 跌落曝氧 降雨径流从跌落段的入口(GSO)开始, 在高处跌至低处的过程中, 径流激烈碰撞于裸露岩石, 使得径流携带的污染物与空气混合, 污染物便可从空气中获得氧气而发生氧化反应。 NH_4^+ -N属耗氧污染物, 在经过跌落段时, 将发生迁移形态、浓度的变异。表5是跌落段入、出口氮的浓度变异特征。从表5可知, NH_4^+ -N在流量限制型事件、物质限制型事件都呈现下降趋势, 而 NO_3^- -N则呈现增加趋势。计算结果表明, 跌落段对 NH_4^+ -N的平均去除负荷为 15.05 g m^{-2} 。可见, 跌落段的跌落曝氧对氮迁移转化具有一定的作用效应。

表 5 跌落段入、出口降雨径流氮的浓度

Table 5 Concentrations for nitrogen in inflow and outflow of the Falling Segment

事件类型	NH_4^+ -N/(mg L^{-1})		NO_3^- -N/(mg L^{-1})	
	GSO	FSO	GSO	FSO
流量限制型 ($n=9$) ^a	1.33 ^a	0.89 ^a	4.97 ^a	6.65 ^a
物质限制型 ($n=7$) ^a	0.69 ^b	0.68 ^b	3.44 ^b	4.16 ^b

注: 上标不同字母表示有统计显著差异性($p < 0.05$) (Note: The different superscripts in each column indicate significant differences at $p < 0.05$)

3.2.3 植物吸收 植被生长及其根系-土壤微生物系统的物理截留、氧化还原、微生物降解等作用, 是自然沟渠植被段氮磷去除的重要作用机理。植被吸收是植被段氮磷去除的重要途径。在雨季(4~9月), 植被段的水花生共可吸收氮磷分别为 15.05、2.06 g m^{-2} , 而水蓼根共可吸收氮磷分别为 6.97、1.31 g m^{-2} , 水蓼茎叶共可吸收氮磷分别为 60.67、9.15 g m^{-2} (表6)。植被段植物在雨季共吸收氮磷分别可达 82.69、12.52 g m^{-2} 。本研究中还发现, 水蓼和芦苇具有相当的氮磷吸收量, 茭草氮磷吸收量与水花生大体相当, 而水稻对磷吸收量小于本研究

中的水花生与水蓼的磷吸收量(姜翠玲, 2004b)。水花生作为外来物种, 广泛分布于我国的许多沟渠中, 去除较难。从本研究中的氮磷吸收量看, 将水花生应用于湿地作为氮磷吸收植物, 应可取得较好效果。水蓼吸收养分能力较高, 但因植株较高、柔韧不足等固有原因, 水蓼具有难抗大水流冲击易发生伏倒、再生能力不强等缺点。

表 6 植被段优势植物在雨季(4~9月)氮磷吸收量和生物量

Table 6 Assimilated nitrogen and phosphorus and the biomass of dominant plants for the Natural Segment during the rainy season (Apr ~ Sep)

植物	N吸收量 /(g m^{-2})	P吸收量 /(g m^{-2})	生物量 /(kg m^{-2})
水花生	15.05	2.06	0.34
水蓼根	6.97	1.31	1.07
水蓼茎叶	60.67	9.15	1.70

4 讨论 (Discussion)

4.1 自然沟渠控制降雨径流中的氮磷的主要作用机制

从氮磷空间迁移特征看, 无论是流量限制型事件, 还是物质限制型事件, 颗粒态氮磷在空间沿程上都呈现递减趋势, 减量最多的渠段都在沉降段和沉沙函。如在 7825 流量限制型事件中, 颗粒态氮在沉降段和沉沙函的减少浓度分别为 6.21、5.17 mg L^{-1} , 而 TN 在沉降段和沉沙函的减少浓度分别为 10.37、9.05 mg L^{-1} ; 如在 7716 物质限制型事件, 颗粒态磷在沉降段和沉沙函的减少浓度分别为 0.16、0.17 mg L^{-1} , 而 TP 在对应渠段的减少浓度分别为 0.29、0.27 mg L^{-1} 。自然沟渠通过沉降段和沉沙函的泥沙截控固持作用, 致使颗粒态污染物和部分附着于泥沙上的溶解态污染物得到有效的去除。可见, 颗粒态污染物是自然沟渠氮磷去除的主要形

态,沉降段和沉沙凼的泥沙截控固持作用是自然沟渠降雨氮磷污染物去除的重要净化机制.沉降段和沉沙凼通过泥沙截控、存储及其中泥沙自身吸附等作用,可较好地去除村镇降雨径流颗粒态污染物,去除氮、磷平均分别为 144.51 、 $65.20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均雨量 37.85mm).同时需指出,自然沟渠中的植被也与沉降段、沉沙凼一样对降雨径流的颗粒物具有截控固持等作用,因而降雨径流在经过自然沟渠时,因颗粒物含量本身的减少以及颗粒物吸附、富集的养分的减少,使得总体负荷的输出得以降低.可见,有效降低降雨径流中的颗粒物浓度和拦截泥沙是控制降雨径流污染的关键.

植物生长及其根系-土壤微生物系统的物理截留、氧化还原、微生物降解等作用,也是自然沟渠植被段氮磷去除的重要作用机制.植物吸收是植被段氮磷去除的重要途径,在雨季共吸收氮磷分别可达 82.69 、 $12.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

自然沟渠跌落段的降雨径流从高处往下跌落,使得水体与空气混合,水体复氧的同时促进 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化.跌落段对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的场均去除负荷为 $15.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,跌落段的跌落曝氧对氮的迁移转化具有一定的作用效应.但是,跌落段的硝化能力偏低,其原因可能是跌落段径流停留时间较短,无充足的反应时间.

4.2 自然沟渠的生态优化

紫色丘陵区村镇分布着大大小小的自然沟渠,如能依据其对降雨径流中氮磷净化作用机制,加以改造和利用,可以成为削减村镇降雨径流中氮磷的因地制宜、经济低廉的有效措施.降雨径流在自然沟渠的停留时间通常较短,这不利于削减径流中的氮磷.因而,合理利用自然沟渠,改造或人为修建沉降塘、湿地等结构组合的生态调控措施,提高降雨径流在自然沟渠的停留时间,促进氮磷污染物在泥沙的附着吸附作用及其泥沙在自然沟渠的滞留量、植物对氮磷污染物的吸收量、以及氮在自然沟渠的硝化转化,进一步提高自然沟渠对村镇降雨径流中氮磷的控制能力.紫色丘陵区土地资源稀缺(李仲明, 1991),自然沟渠占用土地资源少,因地制宜的合理改造和利用,控制降雨径流污染,是一种经济低廉的有效方法.

5 结论 (Conclusions)

1) 溶解态氮是降雨径流氮素在空间沿程上的

主要迁移形态;溶解态磷是流量限制型事件降雨径流磷素空间沿程的主要迁移形态,而颗粒态磷是物质限制型事件降雨径流磷素空间沿程的主要迁移形态.除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在空间沿程上呈先减后增再减少的趋势,其它氮磷污染物均呈现空间沿程的递减趋势.

2) 泥沙截控固持是自然沟渠控制降雨径流氮磷污染的主要作用机制,有效降低径流中颗粒物浓度和拦截泥沙是控制降雨径流氮磷污染的关键.沉降段和沉沙凼可较好地去除村镇降雨径流颗粒态污染物,去除氮磷平均分别为 144.51 、 $65.20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均雨量 37.85mm).植物吸收是植被段氮磷去除的重要途径.植被段植物在雨季共吸收氮磷分别可达 82.69 、 $12.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.跌落曝氧也是降雨径流氮磷污染控制的重要作用机制之一.相对而言,跌落段的硝化能力偏低,其对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的场均去除负荷为 $15.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.需指出,降雨径流污染物输出量的有效减少是整个自然沟渠各种机理的综合作用结果.

责任作者简介:朱波(1966—),男,研究员.主要从事面源污染防治研究. E-mail: bzhu@indec.ac.cn

参考文献 (References):

- American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th ed) [M]. Washington DC: APHA, 105—387
- 刁正俗. 1990 中国水生杂草 [M]. 重庆: 重庆出版社, 129—342
- 刁正俗. 1990 Aquatic weed in China [M]. Chongqing Chongqing Press in China 129—342 (in Chinese)
- Haggard B E, Stanley E H, Hyler R. 1999. Sediment-phosphorus relationships in three northcentral Oklahoma streams [J]. Transactions of the ASAE, 42(6): 1709—1714
- 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 2004a 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, 25(2): 125—128
- Jiang C L, Cui G B, Fan X Q, et al. 2004a Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants [J]. Environmental Science 25(2): 125—128 (in Chinese)
- 姜翠玲. 2004b 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应 [D]. 南京: 河海大学. 23—60
- Jiang C L. 2004. Interception and removal effects of ditch wetland on Agricultural non-point sources pollutants [D]. Nanjing Hohai University. 23—60 (in Chinese)
- Kovacic D A, Davil M B, Gentry L E, et al. 2000 Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agriculture tile drainage [J]. J Environ Qual 29 1262—1274

- Lee JH, Bang K W. 2000 Characterization of urban stormwater runoff [J]. *Water Research*, 34: 1773—1781
- 李仲明. 1991. 中国紫色土(上) [M]. 北京: 科学出版社, 2
- Li Z M. 1991. Purple soils in China (I) [M]. Beijing: Science Press 2 (in Chinese)
- 刘光崧. 1996. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 156—412
- Liu G S. 1996. Physico-chemical analysis and profile description of soil [M]. Beijing: Standard press in China 156—412 (in Chinese)
- 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 2008. 紫色土丘陵区农村集镇降雨径流污染特征 [J]. *环境科学学报*, 28(9): 1823—1831
- Luo Z X, Zhu B, Wang T, *et al*. 2008. Characterization of rainfall-runoff pollution in a small rural township in a hilly area of purple soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 28(9): 1823—1831
- Peterson B J, Wolheim W M, Mulholland P J, *et al*. 2001. Control of Nitrogen Export from Watersheds by Headwater Streams [J]. *Science*, 292 (86): 86—90
- Sansalone J J, Cristina C M. 2004. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds [J]. *J Environ Eng* 130(11): 1301—1314
- Sansalone J J, Buchberger S G. 1997. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. *J of Environ Engng ASCE*, 123(2): 134—143
- Smith D R, Wamauende E A, Haggard B E, *et al*. 2006. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance [J]. *Ecological Engineering* doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.10.013
- 徐红灯. 2007. 农田排水沟渠对流失氮磷的截留和去除效应 [D]. 北京: 北京化工大学, 63
- Xu H D. 2007. Interception and removal effects of agriculture drainage ditch on nitrogen and phosphorus [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 63 (in Chinese)
- 朱波, 汪涛, 徐泰平, 等. 2006. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应 [J]. *山地学报*, 24(5): 601—606
- Zhu B, Wang T, Xu T P, *et al*. 2006. Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of Purple Soil [J]. *Journal of Mountain Science* 24(5): 601—606 (in Chinese)