

# 汉江水源区生态沟渠对径流氮、磷的生态拦截效应

刘泉<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>2,3</sup>, 李鹏<sup>3</sup>, 董廷旭<sup>1</sup>, 黄文军<sup>1</sup>

(1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** [目的] 研究汉江水源区生态沟渠对径流氮、磷的生态拦截效应, 为农业非点源污染的控制提供重要参考和依据。[方法] 设置生态沟渠在不同时间对不同断面水体进行监测。[结果] 同段沟渠内, 侧面外来水对沟渠径流氮浓度变化影响比磷浓度变化明显; 径流 TN, NO<sub>3</sub>-N 浓度在上游、中游和下游断面变异系数分别达到 19.81%~31.88%, 9.57%~16.73% 和 32.14%~42.81%; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 在 4 个断面变异系数在 33.33%~88.46% 范围内变化; 生态沟渠断面之间, 水草拦截净化沟渠段氮、磷含量降低幅度在 9.52%~31.11%。[结论] 沟渠生态拦截对径流氮素净化效果较明显, 同时适当布局拦沙工程可以削减磷素流失。

**关键词:** 生态沟渠; 拦截; 水草; 氮、磷; 汉江水源区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0054-05

中图分类号: X171

**文献参数:** 刘泉, 李占斌, 李鹏, 等. 汉江水源区生态沟渠对径流氮、磷的生态拦截效应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 54-58. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.011

## Effects of Ecological Ditch Interception of Nitrogen and Phosphorus in Water Source Area of Hanjiang River

LIU Quan<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>2,3</sup>, LI Peng<sup>3</sup>, DONG Tingxu<sup>1</sup>, HUANG Wenjun<sup>1</sup>

(1. Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China;

2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the ecological ditch interception for reducing nitrogen and phosphorus in water source area of Hanjiang River in order to provide reference and basis for agricultural non-point source pollution control. [Methods] Ditch water of different sections was monitored at different times of rain events to study the intercept effectiveness of nitrogen and phosphorus. [Results] Nitrogen concentration was more greatly influenced by extraneous water from the ditch side than that of phosphorus at the same section. The variance coefficients of TN and NO<sub>3</sub>-N concentrations were 19.81%~42.81%, 9.57%~16.73% and 32.14%~42.81% at the upstream, middle and lower section, respectively. The variance coefficients of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP were 33.33%~88.46% at four sections. Aquatic plant interception decreased the nitrogen and phosphorus concentrations by 9.52%~31.11%. [Conclusion] Ecological ditch can intercept nitrogen obviously. Meanwhile, some sand interception projects should be arranged appropriately for controlling phosphorus loss.

**Keywords:** ecological ditch; interception; aquatic plant; nitrogen and phosphorus; water source area of Hanjiang River

农田沟渠系统承担着农业小流域非点源污染物向地表水体运移的重要作用, 约 60%~90% 的流域

降雨径流和养分通过沟渠系统输出<sup>[1-3]</sup>。对于农业小流域来说, 沟渠溪流系统组成的运输通道对污染物截

收稿日期: 2015-03-29

修回日期: 2015-06-16

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究”(41330858); 国家自然科学基金项目(41471226); 中国博士后科学基金项目(2014M562338); 水利部公益性行业科研专项(201501045); 绵阳师范学院博士科研启动项目(QD2014A002); 绵阳师范学院青年项目(2013B09)

第一作者: 刘泉(1978—), 男(汉族), 江苏省丰县人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: liuquan78@126.com。

通信作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省镇平县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: zhanbinli@126.com。

留作用不可忽视<sup>[4-5]</sup>。但当前研究水源区生态沟渠系统对农田流失的氮、磷迁移和削减规律资料比较缺乏。沟渠系统污染物的输出直接影响着受纳水体质量,因此,了解沟渠系统对氮、磷的输出和削减规律尤为重要;同时,水草和底泥对渠道径流的氮、磷具有截留和吸附作用,从而减少农业非点源污染对受纳水体的危害<sup>[6-8]</sup>。本研究以石泉县后沟小流域内一条采取不同处理措施的生态沟渠为研究对象,通过对 2011 年汛期当地 4 次明显降雨过程中不同断面渠道水中氮、磷含量定位监测数据进行分析,开展生态沟渠对氮、磷拦截研究,为汉江水源区农业非点源污染的优化控制提供重要参考和依据。

## 1 研究区概况

研究地点位于陕西省石泉县后沟小流域(33°04'19"N,108°12'27"E),小流域面积为 8.21 km<sup>2</sup>,地形为秦岭低山丘陵区,属于南水北调中线工程汉江水源区。该地区夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,为典型的北亚热带季风气候。土壤多呈中性至弱酸性,通透性能较好。由于人为活动,河道滩地已开垦为耕地,以种植水稻、玉米、花生和蔬菜为主,丘陵坡地主要种植柏树、桃树、桑树等。土壤类型主要有水稻土、黄棕壤、潮土、棕壤 4 类,农村居民点零星分布沟渠附近,农田回流水和生活废水通过后沟渠道可以直接排入汉江。

### 1.1 试验设计

(1) 监测断面设置。在后沟小流域内选择一条南北走向的沟道改造为生态沟渠,试验前对该自然排水沟渠按试验要求进行了工程改造以及水生植物种植,并采用断面布设方法<sup>[9]</sup>,沿沟渠上游到下游,设置对照断面 1 个(断面(1),控制断面 2 个(断面 2,3)和削减断面 1 个(断面(4)共 4 个监测断面。

断面 1 设置在生态沟渠的源头,距离下游居民点大约 100 m,断面附近的山坡和沟道坡面零星分布坡耕地,种植一些南瓜、辣椒等蔬菜,基本没有布设水土保持措施;断面 2 设置生态沟渠与农田支沟(排水沟)交汇处下游 50 m 处,该支沟平时干涸,仅在降雨和排灌水时有水,该断面下游的沟渠内生长挺水植物(芦苇、寥草和稗草等),覆盖度在 50%~80%;断面 3 位于水草沟渠下游 5 m 处,该断面为水草沟渠下端;断面 4 设置在后沟小流域出口处(把口站)处,断面 3 到断面 4 基本上没有水草生长。

断面 1 到断面 2 为自然状态下沟道,农村居民点区基本无任何生活垃圾集中收集设施,断面间沟渠长

度约 600 m;断面 2 到断面 4 两侧渠道坡面采用浆砌石硬化,仅有少量旱地回流水通过浆砌石缝隙注入渠道,断面间渠道距离约 2.0 km。在上述四个断面对 2011 年 6 月 16 日、7 月 5 日、8 月 3 日和 9 月 16 日 4 场降雨事件渠道径流水质采取全过程监测,主要监测指标为水体 TN,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP。

### 1.2 样品采集与测试

由于生态沟渠为小流域内排水主沟道,所以小流域地表径流均通过生态沟渠流失。根据小流域面积、地形因素和汇流时间等因素,降雨过程中和降雨后每天采集水样 3 次,采样时间分别为 8:30,13:30 和 17:30,直到沟道径流恢复到降雨前的水位。采样时使用玻璃瓶在断面中心采集两瓶 500 ml 水样,立即送回实验室,放入 4℃ 冰箱避光保存以供氮、磷测定。从断面 1 流速呈现波动变化趋势,在 2011 年 6 月 16 日、7 月 5 日、8 月 3 日和 9 月 16 日 4 场降雨事件中,各断面平均流速分别为:断面 1 沟道坡降比较大,流速最大,达到 1.51 m/s,断面 2 为 1.48 m/s;断面 3 为 0.56 m/s,断面 4 为 0.67 m/s。上述 4 场降雨的流量分别为 3 896,76 605,132 707,417 053 m<sup>3</sup>。水样 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP 用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-水杨酸消解钼锑抗比色法测定<sup>[10]</sup>。水样 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度分别采用苯酚一次氯酸盐比色法测定和镉柱还原法测定<sup>[11]</sup>。运用 Excel 和 SPSS 16.0 软件进行数据统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沟渠不同断面径流氮、磷含量分析

表 1 为生态沟渠上游至下游设置 4 个断面径流氮、磷含量基本情况的统计资料。从表 1 可以看出,不同断面径流中的氮、磷含量存在明显差异。首先,不同断面径流氮、磷平均浓度存在差异。径流 TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 含量在不同断面总体表现为:断面 2 > 断面 3 > 断面 4 > 断面 1;而对于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 来说,表现出断面 4 > 断面 2 > 断面 3 > 断面 1。总体来说,从断面 1 到断面 4 沟渠径流氮、磷含量呈现波动变化的趋势,说明沟渠水体在流动过程中,受到水草拦截和吸附作用,生态沟渠自净作用较为明显。而断面 4 沟渠水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量达到极值,高于其上游断面 2 和断面 3,根据 2011 年 6 月 16 日和 9 月 16 日降雨事件中,沟道断面 4 侧面农田壤中流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均浓度分别为 20.25 和 9.48 mg/L,均显著高于断面 4 水体的 NO<sub>3</sub>-N 浓度(0.89~4.96 mg/L),说明断面 4 处沟渠水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量受到侧面农田壤中流内 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的补充,导致其浓度显著升高。其次,不同断面沟

渠水体氮、磷含量的变异系数差别较大。径流 TN,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量在断面 1,4 变异程度较大,而在断面 2,3 变异程度显著降低;径流 TP 则在断面 1,4 变异程度较大,断面 2,3 变异程度较小。断面 4 沟渠水体 TP 变异系数表现明显,达到 88.46%,由于在该断面泥沙颗粒表面吸附 TP 释放和周围居民生

活污水排放叠加效果所致。沟渠水体  $\text{NO}_3^-$ -N 变异系数较小,在断面 3 表现最为明显,仅为 9.57%,在断面和氮、磷形态含量统计中,沟渠水体  $\text{NO}_3^-$ -N 的变异系数总体上最小,原因是  $\text{NO}_3^-$ -N 主要来自沟渠两侧壤中流的平稳补给,在泥沙含量对其含量变化影响不明显。

表 1 生态沟渠各断面径流氮、磷含量

测试项目	断面	样本数/ 个	最小值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	方差	标准差	变异系数/ %
TN	1	33	0.83	2.65	1.60	0.26	0.51	31.88
	2	33	3.62	6.89	5.29	0.42	0.65	12.29
	3	33	3.28	5.27	4.23	0.27	0.52	12.29
	4	33	1.63	6.29	3.92	1.60	1.26	32.14
$\text{NO}_3^-$ -N	1	33	0.62	1.66	1.06	0.046	0.21	19.81
	2	33	1.98	3.77	2.69	0.20	0.45	16.73
	3	33	1.87	2.81	2.30	0.050	0.22	9.57
	4	33	0.89	4.96	2.85	1.49	1.22	42.81
$\text{NH}_4^+$ -N	1	33	0.05	0.21	0.12	0.001	0.04	33.33
	2	33	0.12	0.88	0.45	0.032	0.18	40.00
	3	33	0.10	0.62	0.31	0.016	0.13	41.94
	4	33	0.04	0.55	0.29	0.018	0.13	44.83
TP	1	33	0.03	0.18	0.07	0.001	0.03	42.86
	2	33	0.10	0.53	0.21	0.014	0.12	57.14
	3	33	0.05	0.65	0.19	0.022	0.15	78.95
	4	33	0.02	0.85	0.26	0.052	0.23	88.46

## 2.2 生态沟渠径流氮、磷含量时间变化特征

根据图 1 显示结果分析,生态沟渠径流 TN,  $\text{NH}_4^+$ -N 含量呈现逐渐降低趋势。在采样首日 TN,  $\text{NH}_4^+$ -N 平均浓度达到最大值,分别为 4.03 和 0.36  $\text{mg/L}$ ,之后沟渠水体中两者含量逐渐降低。直到采样末期,两者含量并没有出现明显反弹。而且,在次降雨过程中,沟渠径流  $\text{NH}_4^+$ -N 含量的下降速度要快于 TN。说明 TN 与  $\text{NH}_4^+$ -N 含量受泥沙沉积、底泥释放等很不稳定,随着时间的持续,各种影响两者含量的作用逐渐平稳,TN 与  $\text{NH}_4^+$ -N 含量也呈现逐渐降低并趋于平稳的态势。

根据 4 场降雨过程沟渠水样监测数据分析,径流  $\text{NO}_3^-$ -N 含量随时间变化规律不显著,总体有波动稍增趋势,说明农田沟渠水体环境呈现好氧和厌氧交替的现象,硝化和反硝化作用交替进行<sup>[12]</sup>,另外,渠道两侧农田回流水和渗漏水的补充和底泥、水生植物等因素条件,可能是导致  $\text{NO}_3^-$ -N 含量呈波动变化的主要原因。

根据图 1 可知,沟渠径流 TP 含量随时间变化很

不稳定。在 20110616,20110705,20110803 降雨事件中,TP 含量呈现微幅波动变化趋势,总体呈现下降的趋势。而在 20110916 降雨事件中,TP 含量变化规律为前半段时间变化趋势是下降,后半段时间变化趋势显著上升。径流 TP 含量从第 1 d 采样 0.24  $\text{mg/L}$  上升到采样第 4 d 的 0.42  $\text{mg/L}$ 。主要由于降雨持续时间较长(94 h),降雨量大(101.2 mm),泥沙流失量达到 1 659.6 t,泥沙沉积在沟底,沟渠植被拦截泥沙作用显著降低,导致泥沙颗粒表面吸附的 TP 随之流入沟道,然后释放进入沟渠径流,说明降雨停止后,随着采样时间延长,沟渠水量减少,流速放缓,泥沙沉积沟道底部,泥沙颗粒表面吸附的 TP 释放持续增加,径流 TP 含量发生明显“浓缩”过程,TP 含量呈现增加的趋势。

## 2.3 生态沟渠拦截 N、P 效果

根据图 2 结果显示,从断面 1 到断面 2,4 场降雨过程中,沟渠右侧农田支沟汇入农田回流水,断面 2 的沟渠水样的氮、磷浓度是断面 1 中的 2.0~5.0 倍,导致断面 2 水样氮、磷负荷急剧增加。

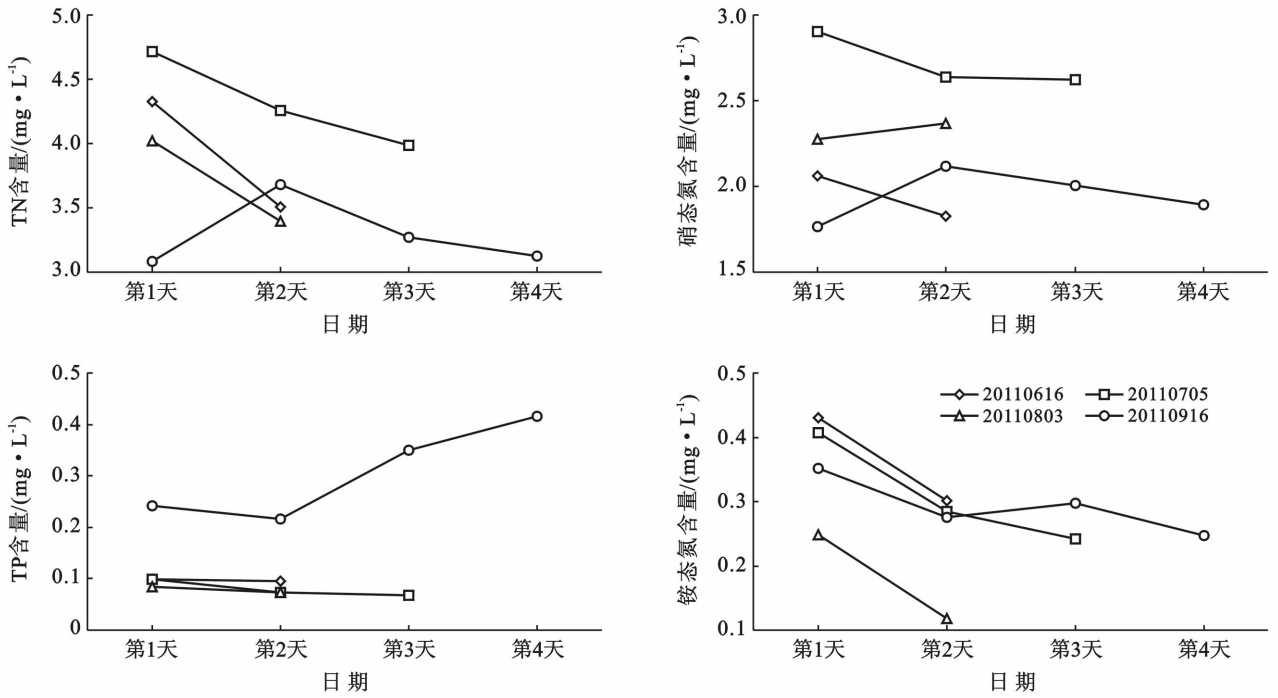


图 1 不同降雨过程下生态沟渠 N、P 浓度时间变化

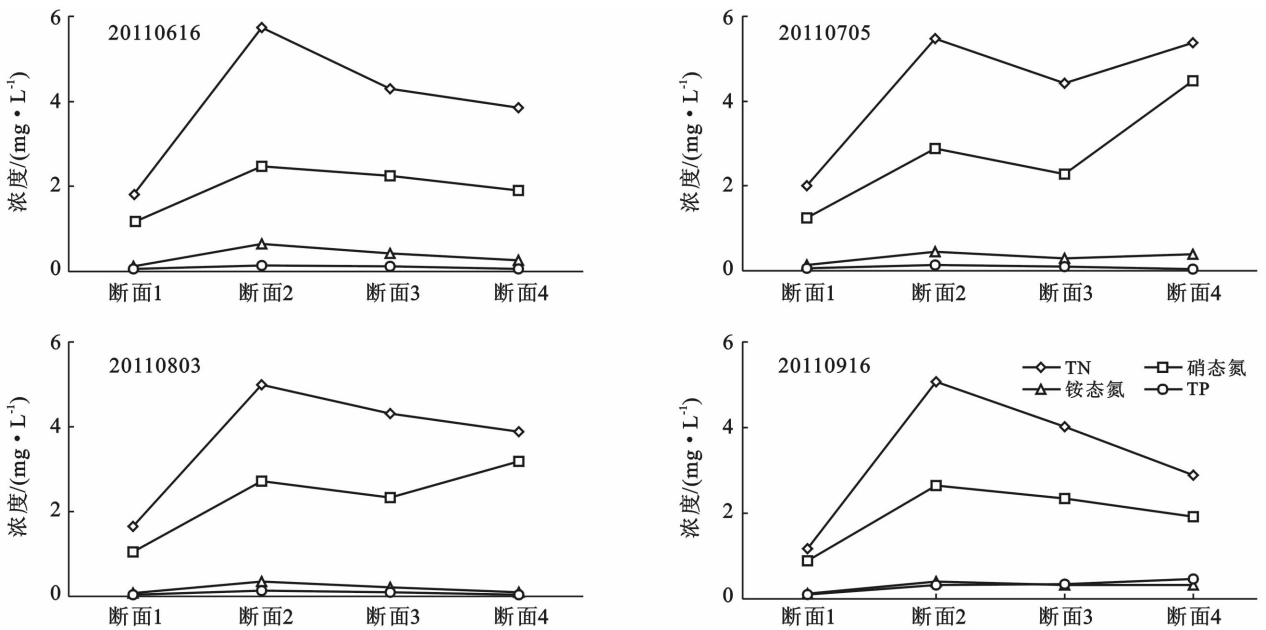


图 2 不同处理断面生态沟渠径流 N、P 浓度变化趋势

从断面 2 到断面 3,无明显侧面地表径流来水,仅有从沟道侧面浆砌石排水孔流出农田壤中流,而且沟渠内生长大量挺水植物(芦苇、寥草和稗草等),沟渠水流速度明显变缓,利于氮、磷的吸附和沉积。因此,该段沟渠氮、磷含量呈现递减趋势。其中,20110616 降雨事件中,沟渠水样  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量从 0.66 mg/L 减少到 0.42 mg/L,降低 36.36%;TN 含量从 5.74 mg/L 减少到 4.29 mg/L,降低 25.26%;20110705 降雨事件中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量从 2.88 mg/l 减少到 2.27

mg/L,降低 21.18%;TP 含量从 0.14 mg/L 减少到 0.09 mg/L,降低 35.71%;该段渠道径流氮、磷降幅最为显著,说明水生植物的生态拦截会对径流氮、磷起到阻滞和净化作用<sup>[13]</sup>。渠道径流  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 被拦截比例约为 30%~35%,而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 被拦截比例为 20%~25%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 被拦截比例明显高于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN,水生植物的生态拦截对削减径流  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 的效果要优于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN。

断面 4 处于断面 3 下游,原本径流氮、磷含量应

该最低,但是断面 4 附近渠道侧面有农田渗漏水 and 少量居民点废水,而且断面 3 与断面 4 距离较近,渠道基本无水生植物生长,渠道水体自净能力较弱,另外,侧面流入水氮、磷含量高于渠道径流氮、磷含量,导致断面 4 处渠道水体氮、磷含量增高,甚至高于断面 2 和断面 3 中水体氮、磷含量。

根据不同渠道断面水样氮、磷浓度变化分析,水草拦截处理对渠道水样 TN,  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的削减效果尤其明显,沟渠水样 TN,  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度降低幅度分别为 20.04%, 31.11% 和 14.50%, 而对渠道水体 TP 的净化效果相对较小,降低幅度仅在 9.52% 左右,说明沟渠内的水草能够有效地将随泥沙携带氮素大量拦截滞留和净化吸收。由表 2 可以看出,水草的生态拦截对生态沟渠的生态净化中有重要作用。

在断面 2 和断面 3 间为水草拦截处理区,渠道径流氮、磷从断面 2 到断面 3 有明显降低,氮、磷浓度从

断面 2 到断面 3 均降低 9.52% 以上,甚至达到 31.11%;在断面 1 和断面 2,断面 3 和断面 4 间为无水草拦截的沟渠段,属于水体自然净化区,水中氮、磷浓度总体显著升高,一方面沟渠有侧面农田回流水,断面 3 和断面 4 的渠道水体氮、磷浓度虽然有降低趋势,但幅度很小,渠道水体氮、磷从断面 3 到断面 4, TN 浓度降低幅度最大,为 7.33%,渠道水体 TP 浓度上升的幅度较为显著,径流  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度明显主要原因是该段渠道缺乏水草拦截,而且渠道两侧有少量农田壤中流汇入。因此,水生植物减缓渠道水体流速、截留泥沙和对养分吸收是净化氮、磷的有效途径。通过断面 1 到断面 2 沟渠径流 TP 增加幅度可知,TP 浓度的增加幅度远低于氮浓度的增加幅度,说明沟渠内自然净化和沟渠泥沙沉积对削减渠道水体磷素具有显著的作用。而沟渠自然净化作用对氮、磷的净化效果相对较弱,渠道水体氮、磷净化必须增加一些林草、工程措施进行降低<sup>[14]</sup>。

表 2 生态沟渠不同处理断面间氮、磷含量降低程度

项目		断面 1	断面 2	断面 3	断面 4
TN	含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1.60	5.29	4.23	3.92
	降幅/%		-230.63	20.04	7.33
$\text{NO}_3^-$ -N	含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1.06	2.69	2.30	2.85
	降幅/%		-153.77	14.50	-23.91
$\text{NH}_4^+$ -N	含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.12	0.45	0.31	0.29
	降幅/%		-275.0	31.11	6.45
TP	含量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.07	0.21	0.19	0.20
	降幅/%		-200.0	9.52	-5.26

### 3 结论

(1) 在具有(没有)侧面外来水源干扰的沟渠段,沟渠径流氮浓度增加(降低)速度要超过磷含量的增加(降低)速度。

(2) 渠道径流  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度下降速度要快于 TN,沟渠径流  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的变化规律不明显,总体有波动稍增趋势。

(3) 沟渠上、下游断面,径流 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变异系数为 19.81%~42.81%,中游断面变异系数为 9.57%~16.73%; $\text{NH}_4^+$ -N 和 TP 浓度在 4 个断面变异系数在 33.33%~88.46% 范围内变化;水草拦截净化沟渠段氮、磷含量降低幅度在 9.52%~31.11%;沟渠生态拦截对水体氮净化效果较明显。

(4) 综合分析认为,生态沟渠水草拦截对削减氮素效果较理想。在不影响小流域行洪的条件下,建议沟渠内种植经济水草,发展当地畜牧养殖业,同时拦

截泥沙和养分流失,合理修建拦沙工程以减少磷素流失。

#### [ 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] Watson A M, Ormerod S J. The distribution of three uncommon freshwater gastropods in the drainage ditches of British grazing marshes[J]. Biological Conser, 2004, 118(4):455-466.
- [3] Kovacic D A, David M B, Gentry L E, et al. Effectiveness of constructed wetlands in reducing nitrogen and phosphorus export from agriculture tile drainage [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4): 1262-1274.
- [4] 徐红灯,席北斗,王京刚,等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84-88.

(下转第 64 页)

- 及空间变异特征[J]. 水利学报, 2007, 38(S1): 691-695.
- [11] 王淮亮, 高君亮, 原伟杰, 等. 戈壁灌丛堆周边地表土壤颗粒的空间异质特征[J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 464-473.
- [12] Wu Zhijun, Huang Zhen, Hao Lijun. An image-shifting technique based on grey-scale classification for particle image velocimetry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38(06): 567-575.
- [13] Grasa G, Abanades J C. A calibration procedure to obtain solid concentrations from digital images of bulk powders [J]. Powder Technology, 2001, 114(1): 125-128.
- [14] 朱元骏, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2008, 38(3): 375-383.
- [15] 赵羽, 金争平等. 内蒙古土壤侵蚀研究[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [16] 张志刚, 高庆先, 矫梅燕, 等. 影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 21-27.
- [17] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 55-59.
- [18] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 等. 我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 1-5.
- [19] 高君亮, 高永, 虞毅, 等. 基于数字图像处理技术的风蚀地表颗粒提取[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 139-142.
- [20] 王鹿振, 虞毅, 高永, 等. 用于沙粒粒级信息提取的数值影像采集条件研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 92-98.
- [21] 张瑞强, 高天明, 郭建英. 内蒙古希拉穆仁草原风蚀水平观测研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 178-181.
- [22] Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science[J]. Geoderma, 2001, 103(1): 3-26.
- [23] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 93-99.
- [24] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 71-99.
- [25] 李兰花. 希拉穆仁草原的退化机理及现状评价研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [26] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 123-128.
- [27] 蒙仲举. 荒漠草原坡面侵蚀分异规律及防控措施研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [28] 曾辰. 水蚀风蚀交错带不同植被覆盖条件坡面土壤水分循环的试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [29] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [30] 陈浩, 方海燕, 蔡强国, 等. 黄土丘陵沟壑区沟谷侵蚀演化的坡向差异: 以晋西王家沟小流域为例[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 176-184.

(上接第 58 页)

- [5] 徐红灯, 席北斗, 翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氨氮的截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1924-1928.
- [6] 罗专溪, 朱波, 唐家良, 等. 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, 2009, 29(3): 561-568.
- [7] 陆宏鑫, 吕伟娅, 严成银. 生态沟渠植物对农田排水中氮磷的截留和去除效应[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 791-795.
- [8] 郝敏, 吕宪国. 沟渠对湿地生物地球化学循环影响初析: 以三江平原湿地为例[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5): 43-45.
- [9] 奚旦立, 孙裕生. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [10] Colvin T S, Rippke G R. Corn response to late spring nitrogen management in the Walnut Creek Watershed [J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4): 1054-1061.
- [11] USEPA. Methods for Chemical Analysis of Water and Waste Water[M]. EPA Environmental Monitoring and Support. Cincinnati, OH, USA, 1979.
- [12] 胡宏祥, 朱小红, 黄界颖, 等. 关于沟渠生态拦截氮磷的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 141-145.
- [13] 余红兵, 肖润林, 杨知建, 等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 686-692.
- [14] 余红兵, 张树楠, 肖润林, 等. 沟渠水生植物资源化利用研究[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 143-149.