

孙彭成, 高建恩, 韩赛奇, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对径流-泥沙-氮素排放影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1177-1185.
SUN Peng-cheng, GAO Jian-en, HAN Sai-qi, et al. Simulation study on the effects of typical gully land consolidation on runoff-sediment-nitrogen emissions in the loess hilly-gully region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1177-1185.

黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对径流-泥沙-氮素排放影响的模拟研究

孙彭成¹, 高建恩^{1,2,3*}, 韩赛奇¹, 尹燕¹, 周媚芳³, 韩剑桥¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程对水资源和水环境的影响难以评价的突出问题和现实需要,通过不同雨强和不同沟道土地整治比例的模拟降雨试验,研究了沟道土地整治工程对地表和地下径流过程的影响,分析了地表和地下径流氮素排放对沟道土地整治工程的响应,探讨了沟道土地整治工程对降水分配和氮素排放的作用机制。结果表明:沟道土地整治能调节降水分配、拦截地表径流、促进降水向地下径流转化,降水分配的调节程度随沟道土地整治比例的增加而增加;与无整治工况相比,在不同的降水强度下,30%和60%的沟道整治平均将降水的地表径流、土壤持留和地下径流比例从62:21:17分别调整为45:22:33和27:23:50。沟道土地整治减少地表径流中泥沙、硝态氮和铵态氮的输出,却有增加地下径流中硝态氮输出的风险;60%的沟道土地整治分别降低地表径流泥沙输出69%~82%、铵态氮输出63%~74%、硝态氮输出31%~48%,增加地下径流中硝态氮输出160%~337%,对地下径流铵态氮输出无影响。

关键词:黄土丘陵沟壑区;沟道土地整治;降水转化;径流泥沙;氮素

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)06-1177-09 doi:10.11654/jaes.2017-0043

Simulation study on the effects of typical gully land consolidation on runoff-sediment-nitrogen emissions in the loess hilly-gully region

SUN Peng-cheng¹, GAO Jian-en^{1,2,3*}, HAN Sai-qi¹, YIN Yan¹, ZHOU Mei-fang³, HAN Jian-qiao¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: It is necessary but difficult to evaluate the influence of gully land consolidation on water resources and water quality in the loess hilly-gully region. Through the rainfall simulation experiments in different rainfall intensities and channel land consolidation ratios, this study evaluated impacts of gully land consolidation project on surface and underground runoff, analyzed responses of gully land consolidation project on nitrogen emissions and also discussed the mechanism of gully land consolidation on precipitation distribution and nitrogen emissions. Results indicated that the gully land consolidation project could regulate the distribution of precipitation, intercept rainfall runoff and

收稿日期:2017-01-09

作者简介:孙彭成(1993—),男,硕士研究生,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:sunpech@163.com

*通信作者:高建恩 E-mail:gaojianen@126.com

基金项目:陕西省自然科学基金计划(2016ZDJC-20);陕西省科技统筹创新工程项目(2013KTDZ03-03-01);国家自然科学基金项目(41371276, 51309194);西北农林科技大学博士科研启动基金(2452015337);中国科学院知识创新工作工程专项(A315021615)

Project supported: Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China(2016ZDJC-20); Science and Technology Innovation Program of Shaanxi Province, China(2013KTDZ03-03-01); The National Natural Science Foundation of China(41371276, 51309194); The Doctor Research Start-up Projects of NWAUFU(2452015337); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(A315021615)

promote the transformation of underground runoff. The regulation level increased with the increase of gully land consolidation ratio, and the average proportions of surface runoff, soil retention and underground residence from precipitation of different rainfall intensities can be adjusted from 62:21:17 to 45:22:33 and 27:23:50 when the gully land consolidation ratios were designed as 30% and 60% respectively. The gully land consolidation project reduced the discharge of sediment, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in surface runoff but with an increased risk of nitrate nitrogen output in groundwater runoff. The gully land consolidation with a proportion of 60% could reduce 69%~82% of sediment output, 63%~74% of ammonium nitrate output, and 31%~48% of nitrate nitrogen output in surface runoff, but increased 160%~337% of nitrate nitrogen output and had no effect on the ammonium nitrogen output in groundwater runoff.

Keywords: loess hilly-gully region; gully land consolidation; precipitation transformation; runoff and sediment; nitrogen

近年来,地处黄土丘陵沟壑区的延安市兴起了以“治沟造地”为代表的沟道土地整治工程项目,引发了学界的普遍关注,其经济、社会和生态效益的合理评价也是项目急需研究的热点^[1-2]。Liu等^[3]对典型项目区的研究认为,项目的实施增加了耕地面积27.41%,减少土壤侵蚀9.87%;Guo等^[4]在富县地区研究表明,沟道造地有效缓解了区域经济发展与环境保护之间的矛盾,有利于退耕还林还草工程的进一步开展;陈怡平等^[5]和Liu等^[6]也认为沟道土地整治工程能显著提高当地粮食产量,对区域水资源高效利用和粮食安全的保障等都具有重要意义,项目评估认定该项目实现了“治沟保生态,造地惠民生”的预设目标^[7]。然而,学界一些专家对延安的沟道土地整治工程存有不同的看法^[8],尤其是延安地区经历2013年连续降雨检验后,项目区新造土地受损达1 848.68 hm²,淤地坝损毁19座^[9],人们对项目实施可能引发的生态环境问题特别是水环境问题更加关注。Jin^[10]认为“填沟造地”工程是一把双刃剑,有可能在地质、生态和环境方面引发一系列问题,其实施需要进一步加强在生态、环境、经济等方面的综合效益评估研究^[2]。一些学者通过现场监测和试验模拟等手段研究沟道土地整治工程可能带来的生态环境影响。Yin等^[11]数值模拟认为,延安地区沟道填埋会抬升主沟道地下水,地貌剧烈变化是地下水抬升的主导因素;娄现勇和高建恩等^[12-13]物理模型模拟表明,沟道土地整治工程能影响流域水文过程,削减洪峰流量。然而,目前关于沟道土地整治工程对水环境的潜在影响及评价则少见报道。

本研究选取项目中典型的沟道土地整治模式,基于构建的室内试验平台,在研究沟道土地整治对地表径流和地下径流过程影响的基础上,分析地表和地下径流中典型面源污染物输出对沟道土地整治工程的响应过程,探讨了沟道土地整治工程对降水分配和污染物输出的作用机制。旨在为沟道土地整治工程对水资源和水环境影响的合理评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验模型搭建

为更准确地构建室内试验平台,对该地区多处沟道土地整治模式进行考察,现以一种典型模式进行说明。图1a为某小流域典型工程的平面布设,该项目位于延河一级支流杜甫川流域上游,沟道内从上游至下游依次设置1~4号共四处拦截田坎,将沟道分割为多段,分区整治,断面示意图如图1b、图1c所示。沟道两侧及沟头山坡削坡开挖,新挖黄土回填于沟道,经平整形成新造土地,山坡脚处修建有排水沟,排出边坡汇流以减轻汇水对新造农田的损坏。该流域沟道整治完成后,2号田坎上游和2号田坎与4号田坎间沟道

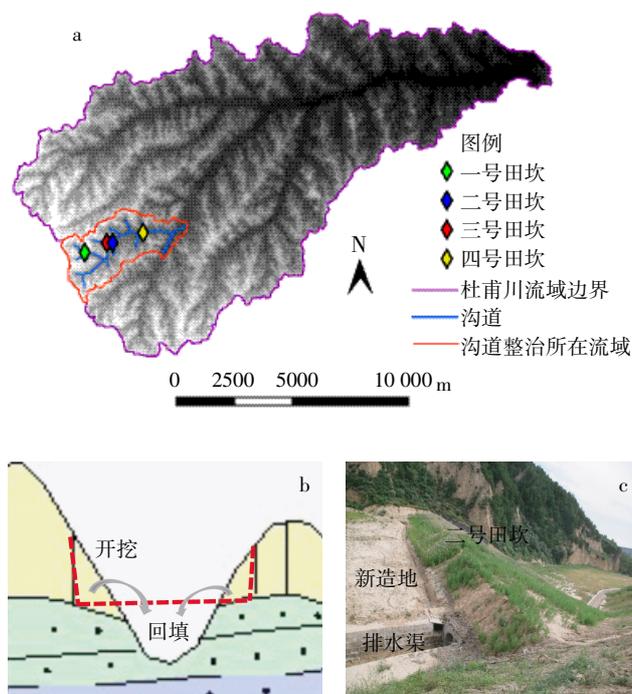


图1 典型沟道整治工程布设示意图

Figure 1 Sketch map of a typical gully land consolidation project site

将整治为新造地,4号田坎下游保留原未淤满的坝地。

根据典型沟道土地整治工程设计特征,抽象提取出共性要素,在前期研究^[14-15]的基础上,于室内构建了典型沟道土地整治工程水环境影响试验模拟装置(图2a)。试验模型长×宽×高=5 m×1 m×1 m,坡度固定为3°。土槽底层填装90 cm厚的下垫砂,模拟沟道底部的砂岩风化层形成的强透水层^[16-17],上层填装10 cm黄土,模拟土体回填。下垫砂粒径为0.25~0.5 mm,黄绵土级配如图2b,硝态氮含量为4.75 mg·kg⁻¹,铵态氮含量为1.42 mg·kg⁻¹。

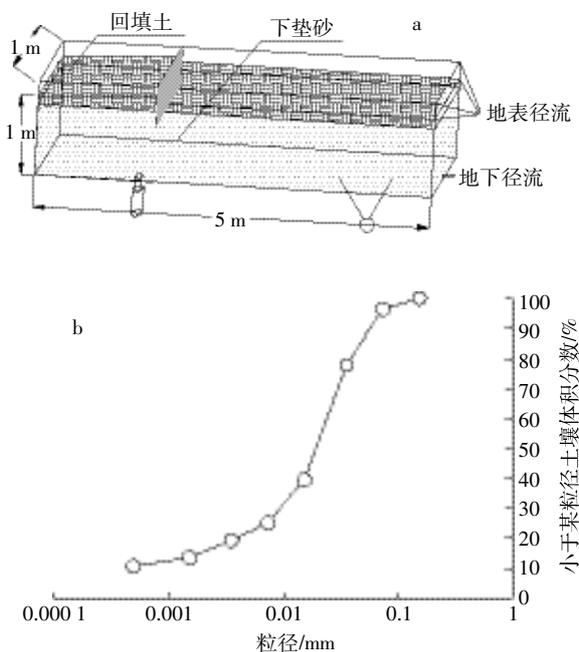


图2 试验模拟装置示意与试验用土级配曲线

Figure 2 Sketch map of the experiment model and the Grain-size refinement of experiment soil

1.1.2 试验工况与降雨设计

室内试验于2016年4—6月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行,降雨设备为下喷式降雨装置。设置三个沟道整治比例(田坎控制面积与沟道总面积之比)分别为0%、30%和60%,其中0%整治比例为原有沟道,30%和60%整治比例分别为主沟道设置一个和两个田坎,对应图1b主沟道的2号和4号田坎。降雨总量设计为120 mm,降雨强度设计为30、60、90 mm·h⁻¹。

1.2 试验方法

回填黄土容重为1.28 g·cm⁻³,含水量13%,模拟农地施肥,施氮量160 kg·hm⁻²、施磷量110 kg·hm⁻²,

施肥种类为硝酸铵和过磷酸钙。下垫砂容重控制在1.4~1.5 g·cm⁻³,每次装填上层黄土之前,用去离子水漫洗砂床3 h,清除其中残留污染物。回填土分为两层,表层5 cm黄土为肥土,下垫5 cm土层未施肥,装填后12~14 h开始降雨。

每次降雨前反复率定雨强和均匀度,降雨均匀度大于90%。地表开始产流时,记录产流时间,并开始取样。降雨开始前5 min密集取样,而后拉大取样间距,其余径流全部收集在大径流桶中。泥沙计算采用烘干法,径流中硝态氮和铵态氮含量采用美国哈希公司生产的DR2800型便携式分光光度计测定。

2 结果与分析

2.1 典型沟道土地整治对径流的影响

2.1.1 对地表径流的影响

沟道整治工程能缩短沟道,改变沟道地形条件,降低洪峰流量和径流系数,改变次降雨径流过程^[18-19]。图3反映了沟道土地整治工程对降水径流的影响。所有场次试验,径流流量表现出先增加后趋于稳定的趋势,降雨时间达到50 min后,流量过程基本稳定。沟道土地整治工程的开展明显减小了地表径流流量,整治比例越大,其减小幅度越大。以60 mm·h⁻¹雨强为例,在0%、30%和60%沟道土地整治比例条件下,径流平均流量分别为63、45、24 mL·s⁻¹,30%和60%的沟道土地整治相对分别减少平均流量29%和62%,接近于沟道整治比例。

2.1.2 对地下径流的影响

沟道治理工程不仅能拦截上方径流,还能增加降雨入渗,增加地下径流,补充地下水^[20-21]。图4反映了沟道土地整治工程对地下径流过程的影响。降雨开始后,地下径流流量先增加后减小,在降雨7~8 h后,地下径流流量达到最大,到降雨24 h后基本结束。相同雨强条件下,地下径流流量随沟道整治比例的增加而增加。以30 mm·h⁻¹雨强试验为例,30%和60%比例的沟道整治分别增加地下径流峰值流量23 mL·min⁻¹和42 mL·min⁻¹,增加幅度分别为77%和223%;增加地下径流平均流量62 mL·min⁻¹和119 mL·min⁻¹,增加幅度分别为53%和112%。

2.1.3 对降水转化的影响

沟道土地整治工程可有效促进地表水向地下水转化,影响流域内的径流组成和分配,对当地和下游水资源都有一定的影响^[22-23]。图5反映了沟道土地整治工程对降水转化的影响。随着沟道整治比例的增

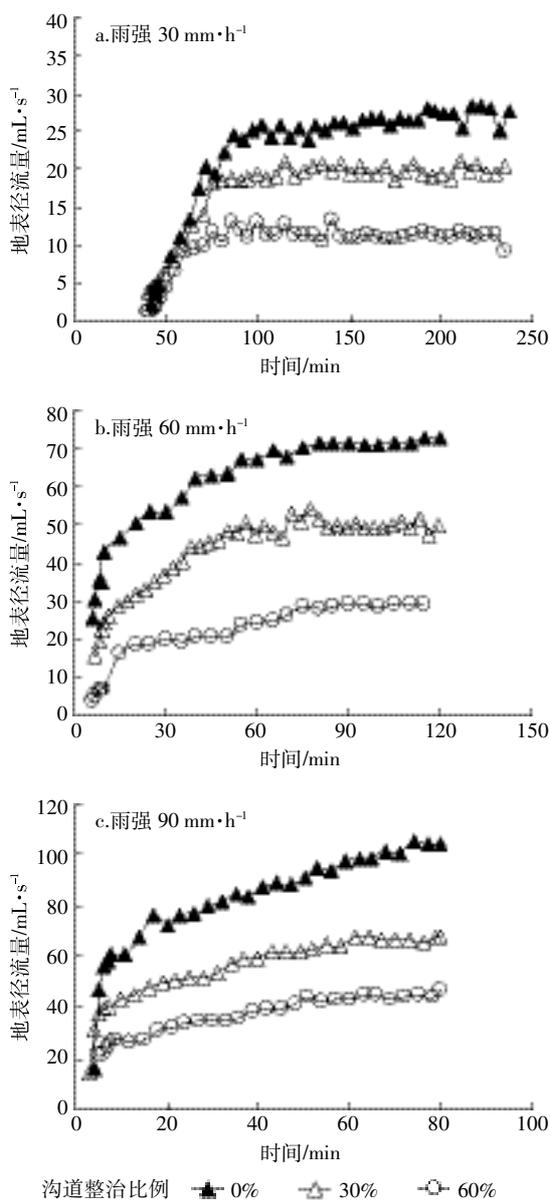


图3 沟道土地整治对地表径流过程的影响

Figure 3 Effects of gully land consolidation on surface runoff

加,地表径流所占比例减少,地下径流所占比例增加,土壤持留量基本不变。以 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强为例,沟道整治比例从 0% 增加到 30% 和 60%,地下径流系数从 0.13 分别增加到 0.28 和 0.48,增幅分别为 115% 和 269%,地表径流系数则相应从 0.67 减小到 0.51、0.29,减幅分别为 24% 和 57%,30% 和 60% 的沟道土地整治分别能将地表径流、土壤持留和地下径流的比例从 67:20:13 调整为 51:21:28 和 29:23:48。

2.2 典型沟道土地整治对水质的影响

2.2.1 对地表径流泥沙负荷的影响

从水质角度看,泥沙本身就是一种重要的污染

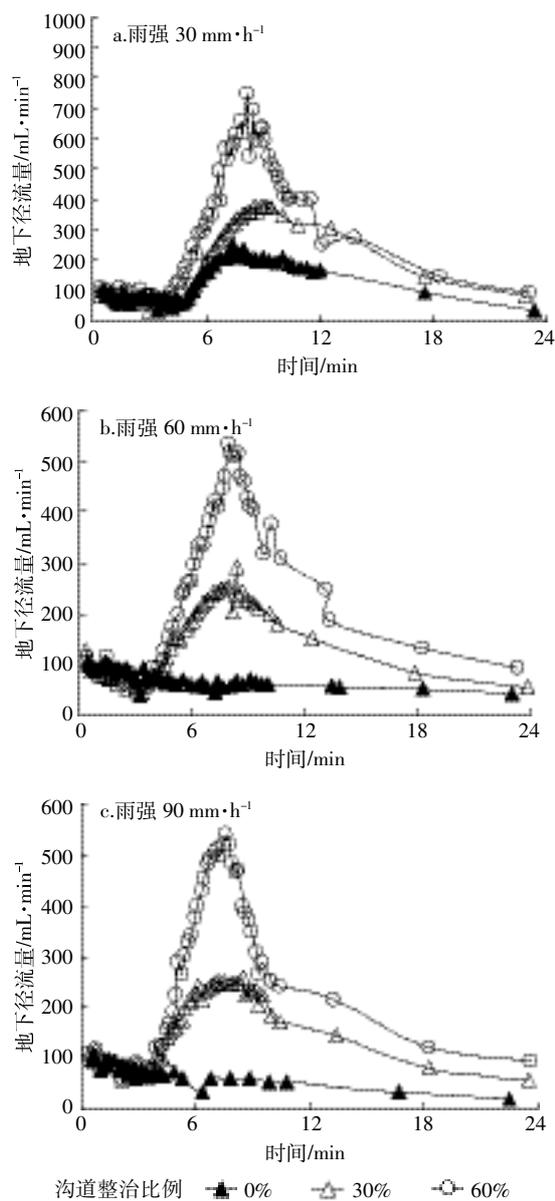


图4 沟道土地整治对地下径流的影响

Figure 4 Effects of gully land consolidation on groundwater

物,也是许多污染物的主要载体,还决定着这些污染物的迁移、转化和生物效应等^[24-25]。沟道治理工程可以拦蓄降雨带来的上游控制面积的水沙,将泥沙沉淀,从而达到控制面源污染、保护水环境的作用^[26]。表1反映了沟道土地整治工程对地表径流泥沙输移的作用。可以看出,沟道土地整治工程能减少地表径流泥沙输移量。以 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强为例,试验条件下,30% 和 60% 的沟道土地整治分别减少泥沙输移 327.7 g 和 494.4 g,分别降低 54% 和 81%,大于沟道土地整治比例。泥沙输移的减少是径流和含沙量减少共同作用的结果。上文分析表明,沟道土地整治工程对地表径流

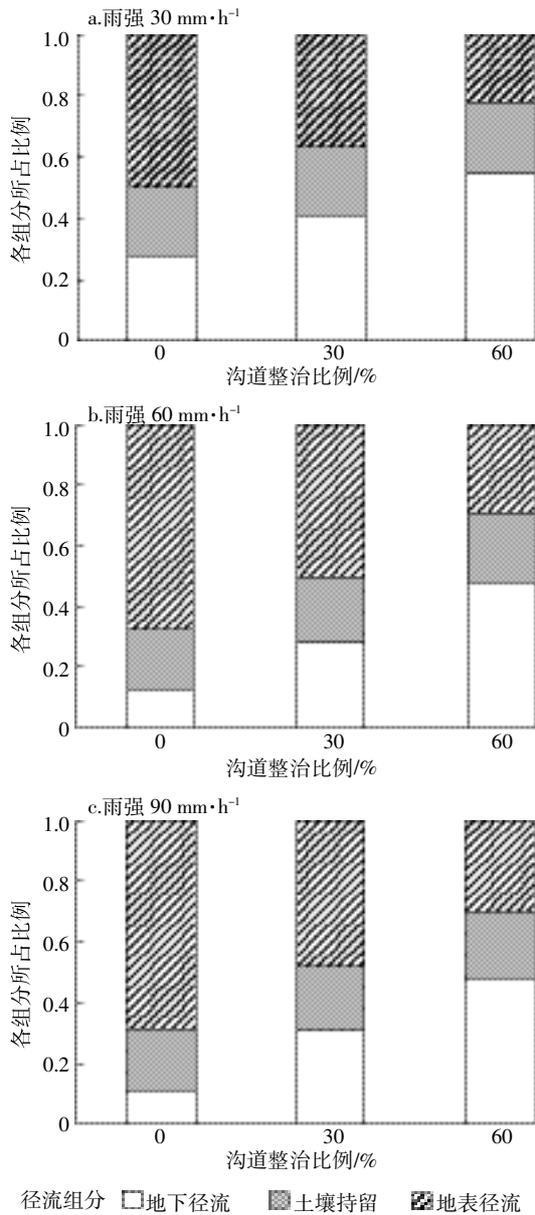


图5 沟道土地整治对降水分配的影响

Figure 5 Effects of gully land consolidation on groundwater precipitation conversion

表1 沟道土地整治对输沙的影响

Table 1 Effects of gully land consolidation on sediment discharge

降雨强度/ mm·h ⁻¹	沟道整治比例 0%		沟道整治比例 30%		沟道整治比例 60%	
	输沙量/ g	含沙量/ g·L ⁻¹	输沙量/ g	含沙量/ g·L ⁻¹	输沙量/ g	含沙量/ g·L ⁻¹
30	172.3	0.60	116.2	0.54	53.1	0.41
60	608.2	1.40	280.4	0.92	113.8	0.69
90	972.3	2.46	403.4	1.49	170.3	1.04

的拦截量与沟道土地整治比例接近,输沙量减少幅度则高于径流减少幅度。试验结果表明,60 mm·h⁻¹雨强时,30%和60%的沟道土地整治分别减少泥沙含量0.48 g·L⁻¹和0.71 g·L⁻¹,降低幅度分别为34%和51%。

2.2.2 对地表径流氮素污染的影响

面源污染物通常以吸附态和溶解态进入地表径流,其载体分别是径流和泥沙^[27],沟道治理工程在影响径流和泥沙输出特征的同时,也会影响流域面源污染物的输出特征,尤其是在流域面源污染中占有重要作用的氮素的污染特征^[28]。表2反映了沟道土地整治工程对地表径流氮素排放的影响。可以看出,硝态氮是地表径流中氮素污染的主要类型,其含量是铵态氮含量的8.6~25.2倍。沟道土地整治工程能减少地表硝态氮和铵态氮的排放,以60 mm·h⁻¹雨强为例,试验条件下,30%和60%的沟道土地整治分别减少硝态氮输移39.26 mg和300.96 mg,分别降低5%和41%,小于沟道土地整治比例;分别减少铵态氮输移31.33、50.09 mg,分别降低42%和74%,大于沟道土地整治比例。沟道土地整治工程对地表径流中两种氮素污染的拦截机制不同。对于地表径流中硝态氮而言,沟道土地整治工程是通过拦截径流而拦截其输出。以60 mm·h⁻¹雨强为例,试验条件下,30%和60%的沟道土地整治分别增加硝态氮含量0.58 mg·L⁻¹和0.94 mg·L⁻¹,相对分别增加为34%和55%。地表径流中铵态氮

表2 沟道土地整治对地表径流氮素污染的影响

Table 2 Effects of gully land consolidation on nitrogen discharge in surface runoff

降雨强度/ mm·h ⁻¹	污染物类型	沟道整治比例 0%		沟道整治比例 30%		沟道整治比例 60%	
		输出量/mg	含量/mg·L ⁻¹	输出量/mg	含量/mg·L ⁻¹	输出量/mg	含量/mg·L ⁻¹
30	硝态氮	520.37	1.81	621.35	2.90	361.11	2.80
60	硝态氮	735.15	1.70	695.88	2.28	434.19	2.64
90	硝态氮	880.57	2.23	690.51	2.55	455.45	2.79
30	铵态氮	38.97	0.14	26.41	0.12	14.33	0.11
60	铵态氮	74.00	0.17	42.67	0.14	18.90	0.12
90	铵态氮	101.80	0.26	47.29	0.17	26.37	0.16

的拦截则同时伴随径流拦截及其含量拦截而发生。以 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强为例, 试验条件下, 30%和 60%的沟道土地整治分别减少铵态氮含量 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别降低 18%和 29%。

2.2.3 对地下径流氮素污染的影响

沟道整治工程改变了径流的分配, 拦截径流在溶解表层土壤中的矿物质后通过地下径流的方式排泄, 对周围地下水的水质产生一定的影响^[29]。表 3 反映了沟道土地整治工程对地下径流氮素污染的影响。可以看出, 沟道土地整治工程有增加地下径流硝态氮污染的风险。由于铵态氮的吸附性较强, 不易随入渗径流移动, 本试验中所有场次地下径流未有铵态氮。以 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强为例, 试验条件下, 30%和 60%的沟道土地整治分别增加硝态氮输出 $2\ 124.98 \text{ mg}$ 和 $5\ 119.06 \text{ mg}$, 相对增加量分别为 140%和 337%, 大于沟道土地整治比例。整体上看, 地下径流硝态氮输出的增加是径流增加和硝态氮含量增加共同作用的结果。试验结果表明, $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强时, 30%和 60%的沟道土地整治分别增加硝态氮含量 $3.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 增加幅度分别为 18%和 34%。

表 3 沟道土地整治对地下径流硝态氮污染的影响

Table 3 Effects of gully land consolidation on nitrogen discharge in groundwater

降雨 强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	沟道整治比例 0%		沟道整治比例 30%		沟道整治比例 60%	
	输出量/ mg	含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	输出量/ mg	含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	输出量/ mg	含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
30	2 707.11	16.57	4 725.70	19.36	7 044.35	21.58
60	1 517.99	18.36	3 642.97	21.73	6 637.55	24.61
90	963.63	15.02	2 847.45	16.36	4 089.40	15.52

3 讨论

3.1 沟道土地整治工程对径流分配的影响

沟道土地整治工程可有效地拦截降水, 改变地表径流和地下径流的分配格局和时序^[30], 还能降低流域汇流速率、减小径流系数, 减少径流向下游的汇集, 其对地表径流的拦截作用随整治比例的增加而增加^[13, 31]。本研究表明, 沟道土地整治工程对地表径流的拦截削减作用随整治比例的增加而增加, 径流流量削减幅度与整治比例基本一致。这是因为径流减少主要是由沟道土地整治工程中田坎拦截引起, 田坎的拦截直接改变沟道内的汇流情况, 整治比例的增加会相应地增加控制面积, 减少沟道内实际汇流面积。在流域产流情况

均匀一致时, 径流量取决于流域汇流面积, 即取决于沟道整治比例大小。田坎所拦蓄地表径流, 能对土壤和地下水起到很好的补充作用, 增加土壤含水和地下径流量^[22, 29]。在本研究中, 沟道土地整治工程对地下径流的洪峰流量和总量均作用明显, 沟道整治比例越大, 所拦蓄地表径流越多, 对地下水的补给越强, 地下径流洪峰流量和总径流量也越大。总体来看, 在本模拟试验系统中, 由于土壤截留持水有限, 且蒸发量也可以忽略不计, 沟道土地整治工程所拦截地表径流基本全部补充地下径流, 这与已有沟道土地整治工程也能增加土壤持水和蒸散发的研究结论不尽一致^[32]。

3.2 不同污染物输出对沟道土地整治工程的响应机制

对污染物输出而言, 径流是污染物输出的载体, 污染物负荷受到径流量的影响, 二者间存在密切的关系^[33-34]。图 6 分析了次降雨各污染物总负荷与径流总量的相关关系, 可以看出, 污染物总负荷随径流总量的增加而增加, 不同的污染物输出变化对沟道土地整治工程的响应特征不同。本研究表明, 实施沟道土地整治工程后, 地表径流中泥沙和铵态氮负荷的减小幅度大于沟道整治比例, 而硝态氮负荷的减小幅度则小于沟道整治比例。地表径流中不同类型污染物输出的响应特征主要取决于地表径流量的变化以及各污染物负荷与径流量间的相互关系特征。已有研究^[35-36]表明, 流域次降雨污染物输出量和径流量可以很好地用幂函数关系描述, 图 6 反映了各污染物负荷与径流量间存在极显著幂函数关系 ($P < 0.01$)。根据回归关系, 地表径流泥沙负荷和铵态氮负荷与径流量回归幂函数的指数值分别为 1.96 和 1.44 (大于 1), 地表径流硝态氮负荷与径流量回归幂函数的指数值则为 0.64 (小于 1), 表明当地表径流量发生变化后, 地表径流输出的泥沙和铵态氮的变化幅度大于径流量的变化幅度, 通过地表径流输出的硝态氮的变化幅度则小于径流量的变化幅度。在本研究中, 沟道土地整治引起的地表径流减少幅度与整治比例基本一致, 当污染物负荷与地表径流量间的幂函数关系的指数值大于 1 时, 沟道土地整治工程造成的污染物负荷减少幅度大于地表径流的减小幅度, 也就较沟道整治比例更大, 反之同理。地下径流硝态氮负荷与地下径流量也呈极显著幂函数关系 ($P < 0.01$), 且回归方程指数值接近于 1。这表明沟道土地整治工程引起的地下径流硝态氮负荷增加幅度与地下径流量增幅比较接近, 与试验结果相一致。

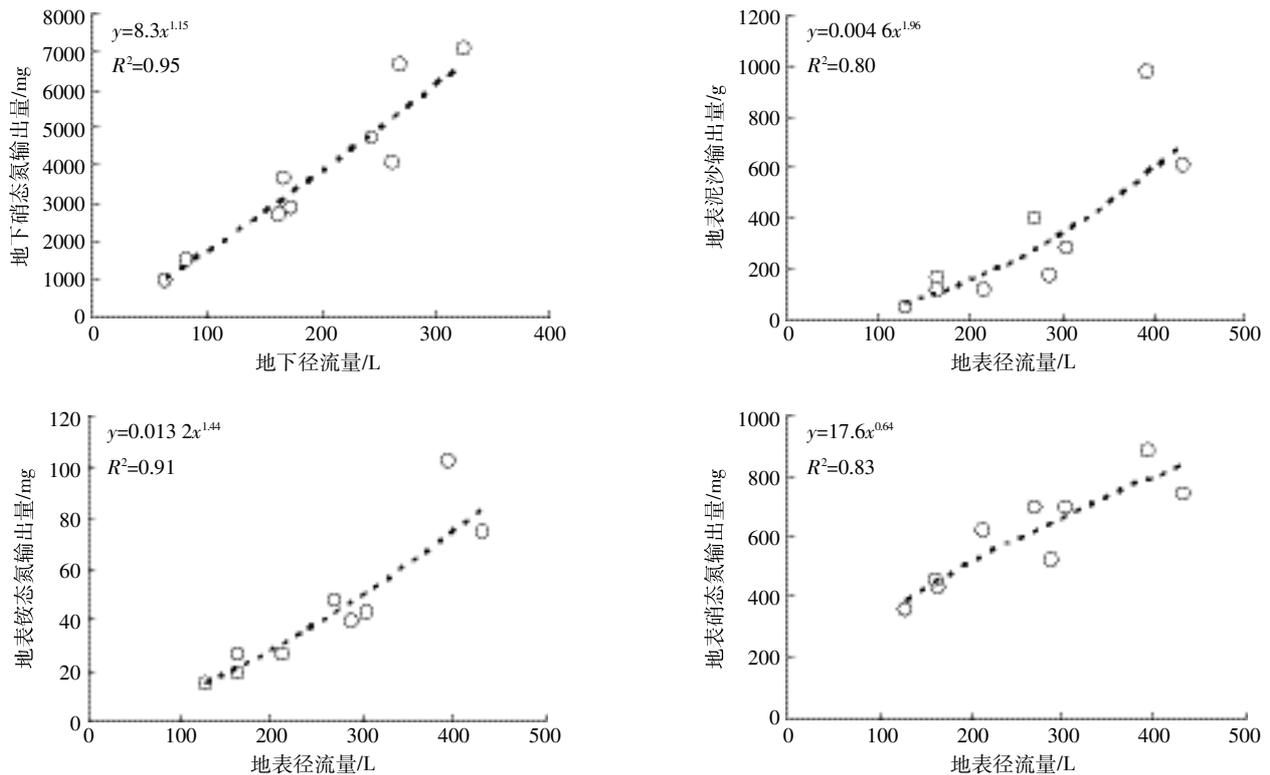


图6 污染物输出负荷与径流量的关系

Figure 6 Relationships between pollutant discharge and runoff

4 结论

(1)沟道土地整治能调节降水分配,拦截地表径流,增加降雨入渗,促进降水向土壤水和地下径流转化。降水分配的调节程度随沟道土地整治比例的增加而增加,与无整治工况相比,在不同的降水强度下30%和60%的沟道整治比例平均可将降水的地表径流、土壤持留和地下径流比例从62:21:17调整为45:22:33和27:23:50。

(2)沟道土地整治能调节面源污染物的输出过程,减少地表径流中泥沙、硝态氮和铵态氮的输出,然而有增加地下径流中硝态氮输出的风险。沟道土地整治工程对地下径流中铵态氮输出无影响,因各试验条件下地下径流中始终无铵态氮输出。

参考文献:

- [1] Liu Y S, Li Y H. China's land creation project stands firm[J]. *Nature*, 2014, 511(7510):410.
- [2] Li P Y, Qian H, Wu J H. Accelerate research on land creation[J]. *Nature*, 2014, 510(7503):29-31.
- [3] Liu Y S, Guo Y J, Li Y R, et al. GIS-based effect assessment of soil erosion before and after gully land consolidation: A case study of Wangji-agou project region, Loess Plateau[J]. *Chinese Geographical Science*,

2015, 25(2):137-146.

- [4] Guo Y J, Liu Y S, Wen Q, et al. The transformation of agricultural development towards a sustainable future from an evolutionary view on the Chinese Loess Plateau: A case study of Fuxian County[J]. *Sustainability*, 2014, 6(6):3644-3668.
- [5] 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(5):265-269.
CHEN Yi-ping, LUO Shi-ming, LI Feng-min, et al. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(5):265-269.
- [6] Liu Q, Wang Y Q, Zhang J, et al. Filling gullies to create farmland on the loess plateau[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14):7589-7590.
- [7] 新华网. 延安治沟造地工程通过国家年度评估[EB/OL]. [2017-02-14]. http://news.xinhuanet.com/politics/2014-07/21/c_1111722773.htm
Xinhuanet. The gully land renovation project of Yan'an passed national annual assessment[EB/OL]. [2017-02-14]. http://news.xinhuanet.com/politics/2014-07/21/c_1111722773.htm
- [8] 张信宝, 金 钊. 延安治沟造地是黄土高原淤地坝建设的继承与发展[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(4):261-264.
ZHANG Xin-bao, JIN Zhao. Gully land consolidation project in Yan'an is inheritance and development of wrap land dam project on the Loess Plateau[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(4):261-264.
- [9] 贺春雄. 延安治沟造地工程水毁成因及对策[J]. *陕西水利*, 2014(1):161-162.

- HE Chun-xiong. The causes and countermeasures to the destroy of land consolidation in gullies[J]. *Shanxi Shuili*, 2014(1):161-162.
- [10] Jin Z. The creation of farmland by gully filling on the Loess Plateau: A double-edged sword[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(2):883-884.
- [11] Yin X X, Chen L W, He J D, et al. Characteristics of groundwater flow field after land creation engineering in the hilly and gully area of the Loess Plateau[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(14):646.
- [12] 娄现勇. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治小流域控制工程设计标准研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- LOU Xian-yong. The study on effect of land consolidation engineering of gully channel on design standard of control project of watershed in the Loess hilly and gully region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [13] 娄现勇, 高建恩, 韩赛奇, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程对流域产汇流的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10):23-27.
- LOU Xian-yong, GAO Jian-en, HAN Sai-qi, et al. Influence of land consolidation engineering of gully channel on watershed runoff yield and concentration in loess hilly and gully region[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(10):23-27.
- [14] Wang H, Gao J E, Zhang M J, et al. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model[J]. *Catena*, 2015, 127:80-91.
- [15] Wang H, Gao J E, Li X H, et al. Nitrate accumulation and leaching in surface and ground water based on simulated rainfall experiments[J]. *PLoS one*, 2015, 10(8):e136274.
- [16] 朱太芳. 陕北坝地水文地质条件与盐渍沼泽化防治[J]. 中国水土保持, 1985, 34(1):9-16.
- ZHU Tai-fang. Hydrogeology of land behind silt-arresters in North Shaanxi and prevention of waterlogging salinization and alkalization [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1985, 34(1):9-16.
- [17] 董 琪. 延安市河谷系统与地质灾害相关性分析研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- DONG Qi. The correlation research on geological disasters and river-valley system in Yan'an[D]. Xi'an:Chang'an University, 2012.
- [18] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013(4):9-16.
- YAN Qing-hong, YUAN Cui-ping, LEI Ting-wu, et al. Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013(4):9-16.
- [19] Yan Q H, Lei T W, Yuan C P, et al. Effects of watershed management practices on the relationships among rainfall, runoff, and sediment delivery in the hilly-gully region of the Loess Plateau in China[J]. *Geomorphology*, 2015, 228:735-745.
- [20] 毕慈芬, 郑新民, 李 欣, 等. 黄土高原淤地坝建设对水环境的调节作用[J]. 人民黄河, 2009, 31(11):85-86.
- BI Ci-fen, ZHENG Xin-min, LI Xin, et al. The regulating effects of check dams to water environment in the Loess Plateau[J]. *Yellow River*, 2009, 31(11):85-86.
- [21] 綦俊谕, 蔡强国, 方海燕, 等. 岔巴沟流域水土保持减水减沙作用[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1):28-33.
- QI Jun-yu, CAI Qiang-guo, FANG Hai-yan, et al. Effects of soil and water conservation on reduction of runoff and sediment in Chabagou watershed[J]. *Science of Soil And Water Conservation*, 2010, 8(1):28-33.
- [22] 徐小玲, 延军平, 梁煦枫. 无定河流域典型淤地坝水资源效应比较研究:以辛店沟、韭园沟和裴家峁为例[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(12):77-83.
- XU Xiao-ling, YAN Jun-ping, LIANG Xu-feng. The water resources effect of typical soil-saving dams in Wuding River drainage basin: A case study in Xindian, Jiuyuan and Peijiamao ditch[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(12):77-83.
- [23] 刘会源. 黄土高原淤地坝建设对黄河水资源的影响预测[J]. 中国水土保持, 2004(7):36-38.
- LIU Hui-yuan. Detecting the influence of warping dam building in Loess Plateau area on water resources of the Yellow River[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(7):36-38.
- [24] 陈静生, 余 涛. 对黄河泥沙与水质关系的研究:回顾及展望[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(6):950-956.
- CHEN Jing-sheng, YU Tao. Effects of the suspended sediment on the water quality in the Yellow River[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(6):950-956.
- [25] 孙剑辉, 柴 艳, 王国良, 等. 黄河泥沙对水质的影响研究进展[J]. 泥沙研究, 2010(1):72-80.
- SUN Jian-hui, CHAI Yan, WANG Guo-liang, et al. Review on effects of sediment on the water quality of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(1):72-80.
- [26] 王昭艳, 李亚光, 李 湛, 等. 水土流失防治措施在非点源污染控制中的作用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6):92-94.
- WANG Zhao-yan, LI Ya-guang, LI Zhan, et al. Function of harness of soil and water loss on control of non-point pollution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(6):92-94.
- [27] 王全九, 杨 婷, 刘艳丽, 等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):67-82.
- WANG Quan-jiu, YANG Ting, LIU Yan-li, et al. Review of soil nutrient transport in runoff and its controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):67-82.
- [28] Howden N J K, Burt T P, Worrall F, et al. Nitrate pollution in intensively farmed regions: What are the prospects for sustaining high-quality groundwater?[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(6). DOI: 10.1029/2011WR010843
- [29] 宋献方, 刘 鑫, 夏 军, 等. 基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水-地下水转化关系研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1):8-20.
- SONG Xian-fang, LIU Xin, XIA Jun, et al. Interactions between surface water and groundwater in Chabagou catchment using hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(1):8-20.
- [30] 郑宝明. 淤地坝试验研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003.
- ZHENG Bao-ming. Experiments and practices of check dams[M].

- Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2003.
- [31] 袁建平, 雷廷武, 蒋定生, 等. 不同治理度下小流域正态整体模型试验: 工程措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 22-25.
- YUAN Jian-ping, LEI Ting-wu, JIANG Ding-sheng, et al. Simulated experimental study on normalized integrated model for different degrees of erosion control for small watersheds[J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(1): 22-25.
- [32] 黄金柏, 付强, 桧谷治, 等. 黄土高原小流域淤地坝系统水收支过程的数值解析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 51-57.
- HUANG Jin-bai, FU Qiang, Hinokidani Osamu, et al. Numerical analysis of water budget process of check dam system in small basin on Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 51-57.
- [33] 马岚, 滕彦国, 林学钰, 等. 晋江金鸡闸断面污染源负荷及水质敏感期的确定[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1126-1133.
- MA Lan, TENG Yan-guo, LIN Xue-yu, et al. Determination of area source pollution load and fragile water quality period of Jinji Sluice Section of Jinjiang River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(10): 1126-1133.
- [34] 朱萱, 鲁纪行, 边金钟, 等. 农田径流非点源污染特征及负荷量化方法探讨[J]. 环境科学, 1985, 6(5): 6-11.
- ZHU Xuan, LU Ji-xing, BIAN Jin-zhong, et al. Study on the feature and load estimation method for agricultural non-point source pollution[J]. *Environmental Sciences*, 1985, 6(5): 6-11.
- [35] 郑明国, 蔡强国, 程琴娟. 一种新的流域水沙关系模型及其在年时间尺度的应用[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 745-754.
- ZHENG Ming-guo, CAI Qiang-guo, CHENG Qin-juan. One new sediment yield model for single storm events and its application at annual time scale[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 745-754.
- [36] Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Sediment yield modelling for single storm events based on heavy-discharge stage characterized by stable sediment concentration[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2007, 22(3): 208-217.