

## 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究

关荣浩, 马保国, 黄志僖, 齐拴旺

### 引用本文:

关荣浩, 马保国, 黄志僖, 等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 581-589.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0991>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究

薛鹏程, 庞燕, 项颂, 胡小贞, 王欣泽

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1362-1368 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0382>

### 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究

陈秋会, 席运官, 王磊, 李妍, 张弛, 田伟, 田然, 肖兴基, 赵克强

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1550-1558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0102>

### 不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287-2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>

### 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估

孙铖, 周华真, 陈磊, 沈珍瑶

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1266-1273 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0800>

### 喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 安艳玲, 付宇文, 刘瑞禄, 吕婕梅

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 756-765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1486>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

关荣浩, 马保国, 黄志僖, 等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 581-589.

GUAN Rong-hao, MA Bao-guo, HUANG Zhi-xi, et al. Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 581-589.

## 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究

关荣浩, 马保国\*, 黄志僖, 齐拴旺

(河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 农田氮磷养分流失是我国农业面源污染的主要污染源, 为了研究冀南地区农田氮磷流失特征, 本文采用人工模拟降雨大田试验的方法, 测定施肥前后裸地农田地表径流与壤中流氮磷流失量, 分析径流中不同形态氮磷的流失规律。结果表明: 地表径流与壤中流的产流存在明显差异, 地表径流产流过程波动明显, 壤中流流量变化较为平缓并具有一定的滞后性, 且在总径流量中的比例较小, 两次试验分别占 9.0% 与 13.1%; 径流中氮素浓度在产流初期较高, 随后迅速衰减, 产流后 0~35 min 是累积氮流失量较快的时段; 产流中可溶性氮的输出以硝氮为主, 占累积流失量的 71.0%~99.7%, 且硝氮的流失极易受水文因素的影响; 磷元素在径流中的含量较低, 多以颗粒态存在, 并且随着产流时间的延长, 壤中流逐渐成为磷流失的主要途径; 累积产流量与累积氮、磷流失量之间可分别用线性拟合与幂函数拟合, 拟合优度分别在 0.99 与 0.97 以上, 存在显著相关关系。研究结果表明, 冀南地区农田在降雨之后氮磷流失量巨大且呈现一定规律性, 适宜氮肥施用量与控制产流前期养分流失是防控当地农业非点源污染的有效途径。

**关键词:** 人工模拟降雨; 氮磷流失; 非点源污染; 地表径流; 壤中流

中图分类号: X833 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)03-0581-09 doi:10.11654/jaes.2019-0991

### Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China

GUAN Rong-hao, MA Bao-guo\*, HUANG Zhi-xi, QI Shuan-wang

(School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056002, China)

**Abstract:** Nitrogen and phosphorus nutrient loss in farmland is the major pollution source for agricultural non-point source pollution in China. A field experiment using artificial simulated rainfall was carried out to study the characteristics of nitrogen and phosphorus loss through surface runoff and interflow in farmland in southern Hebei Province. The results showed that, there was a remarkable difference between characteristics of surface runoff and interflow. The process of surface runoff fluctuated noticeably. The interflow changed more subtly and with a certain hysteresis, and its proportion of the total runoff was smaller, accounting for 9.0% and 13.1% in the two tests that were conducted. The concentration of nitrogen in the runoff was higher in the early stage of runoff production and then decayed rapidly. The first 35 min after runoff generation was the period of most rapid loss of accumulated nitrogen. The output of soluble nitrogen in the runoff was primarily nitrate nitrogen, accounting for 71.0% to 99.7% of the cumulative loss, and the loss of nitrate nitrogen was highly susceptible to hydrological factors. The content of phosphorus in the runoff was lower, mostly in the form of particles in the soil, and with the extension of runoff time, interflow gradually became the primary means of phosphorus loss. There is a significant correlation between cumulative runoff and cumulative loss of nitrogen and phosphorus, which can be fitted by linear fitting and power function, respectively, and the goodness of

收稿日期: 2019-09-09 录用日期: 2019-11-26

作者简介: 关荣浩(1996—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事水资源综合利用及保护研究。E-mail: guanrhchn@foxmail.com

\*通信作者: 马保国 E-mail: mabghd@aliyun.com

基金项目: 河北省科技项目(12220802D, 16274207D); 河北省高校科技计划重点项目(ZD2015083)

**Project supported:** Funding of Science and Technology Projects in Hebei Province(12220802D, 16274207D); Key Projects of Science and Technology Plan in Colleges and Universities in Hebei Province(ZD2015083)

fit was above 0.99 and 0.97, respectively. The results show that the loss of nitrogen and phosphorus after rainfall in farmland in southern Hebei is huge and show a certain regularity. An effective way to prevent and control local agricultural non-point source pollution is therefore by suitable application of nitrogen fertilizer and controlling nutrient loss in the early stage of runoff generation.

**Keywords:** artificial simulated rainfall; nitrogen and phosphorus loss; non-point source pollution; surface runoff; interflow

当前我国点源污染得到有效控制,面源污染成为危害环境的主要因素,其中农业面源污染是面源污染的重要组成部分<sup>[1]</sup>,畜禽养殖、农业种植和农村生活污染被认为是农业面源污染的三大来源<sup>[2-6]</sup>,农田土壤养分流失是农业种植污染源的主要表现形式<sup>[7-8]</sup>,该问题也是国内外学者广泛关注的热点问题<sup>[9-10]</sup>。农业种植生产活动中氮磷元素进入水环境的比例普遍超过污染总量的30%与20%,既导致了土地生产力下降,也是造成水体富营养化的主要原因之一<sup>[11]</sup>。研究农田土壤氮磷的流失过程对保证农业生产与控制农业面源污染具有重要的理论与实践价值。目前国内外学者针对不同地域的土壤养分流失研究颇多,并取得了显著成果。邬燕虹等<sup>[12]</sup>采用人工降雨探究坡长和降雨强度对氮素流失的影响,结果表明径流中总氮与硝氮的流失量与坡长、雨强、径流量存在极显著相关水平,相关性依次为径流量>雨强>坡长,而径流中氨氮的流失量只与雨强显著相关。王全九等<sup>[13]</sup>通过野外水流冲刷试验对比分析了6种植被条件下坡面产流产沙及氮磷流失特征,发现野外草本植被在拦截径流、减少土壤侵蚀和控制养分流失方面要优于农田作物。郑海金等<sup>[14]</sup>研究了红壤坡耕地典型旱作模式的土壤在地表径流和壤中流中所产生的氮磷流失特征差异,壤中流总氮、硝态氮含量是地表径流相应养分含量的5.97~22.19、7.82~42.57倍,壤中流携带流失的养分不容忽视。王丽等<sup>[15]</sup>研究了不同坡度坡耕地对土壤氮磷流失的影响,在恒定降雨强度下,坡度对径流中养分浓度的变化在10°~15°区间存在显著影响的转折点。基于上述研究成果,目前已有的研究区域大都集中在黄土高原地区与南方地区,对于华北平原的土壤养分流失研究甚少,受制于研究区域地理位置、地形地貌、土壤类型、作物种类与耕作方式等多种因素的影响,目前关于土壤养分流失的模拟试验大多是通过室内降雨与小型土槽进行,采用野外大田的方式研究地表径流与壤中流氮磷元素迁移转化规律的相对较少。河北省作为我国重要的粮食生产基地,2017年全年粮食播种面积619.1万hm<sup>2</sup>,化肥使用量332.0万t,仅次于河南和山东<sup>[16]</sup>,其每年土壤养分流失量巨大,是重要的面源污染源之一。鉴于此,本研

究采用大田试验,利用室外人工模拟降雨方法,通过测定田间地表径流与壤中流氮磷流失量,获得冀南地区农田养分流失动态曲线,分析地表径流与壤中流不同形态氮磷所占比重及变化趋势,尽可能地还原农田中氮磷流失的完整过程,以期对河北省南部平原区氮磷流失及农业面源污染控制提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

模拟试验在邯郸市永年区河北工程大学洺关校区人工降雨径流-节水灌溉实验基地进行。实验基地位于河北省邯郸市滏阳河流域,属典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温13.5℃,年平均降水量为539.4mm,降雨较为集中,雨热同期,6—9月份占全年降水量的70%~80%左右,2000年以来最大6h降雨量为339.5mm(2016年7月)<sup>[17]</sup>。人工降雨径流实验场总面积约为770m<sup>2</sup>,2018年实验场种植过一季秋作物,2019年4月开始本次试验时试验区域为裸地状态,实验场土壤理化性质见表1。实验场共安装降雨行车5台,用来模拟人工降雨,最大可以模拟200mm·h<sup>-1</sup>的人工降雨。整个实验场均匀布设了10个翻斗式雨量筒测量人工模拟降雨的实际降雨量。实验场下垫面土层保持为天然状态,3m厚土层共分为6层,在每层的底部(距离地表10、30、60、100、200cm与300cm处)通过集水设施将该层汇水收集后,由浮子式自动水位计和超声波水位计配合三角堰测定不同土层出水量,如图1所示。

### 1.2 试验方法

试验于2019年4月在人工降雨径流实验场内进行,试验区域154m<sup>2</sup>。试验前首先进行雨强的率定,当降雨强度与均匀度达到要求之后开始降雨试验。第一次降雨试验日期为2019年4月3日,根据邯郸市气象局资料显示,2000年以来邯郸市最大降雨强度达到123.1mm·h<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>,本试验设置降雨强度80mm·h<sup>-1</sup>,降雨时间40min,观察采样区土层汇流槽,在每层产流开始后单独记录时间,每隔5min采样一次,每次500mL水样,直至产流结束,第一次降雨试验完成。初次降雨试验完成后在试验区域人工地表撒施化肥,

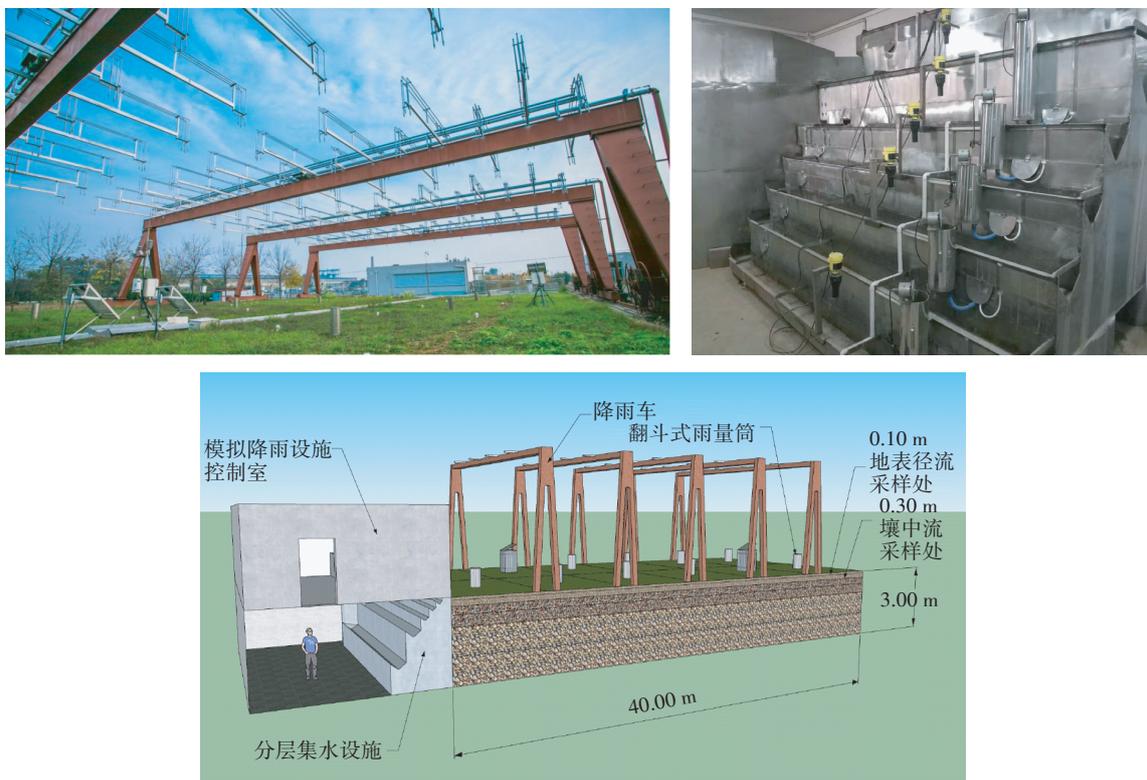


图1 人工降雨径流实验场及分层集水设施示意图

Figure 1 Schematic diagram of artificial rainfall runoff experimental site and stratified water collection facilities

实地调查试验区当地农民施肥习惯,以此设计施肥标准,单位面积N与 $P_2O_5$ 施肥量分别为 $260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,试验区共施脲甲醛 $6.919 \text{ kg}$ ,磷酸二铵 $10.713 \text{ kg}$ 。施肥一周后(2019年4月10日)进行第二次降雨试验,试验步骤与第一次降雨试验相似。地表径流与壤中流中的全氮包括颗粒态氮和溶解态氮两部分,而在径流中氮素流失以溶解态为主,可溶性氮主要包括硝氮与氨氮<sup>[18]</sup>,因此本研究中将氨氮与硝氮之和视为可溶性氮量。采集的水样带回实验室,在48 h内进行养分含量测定。每份水样测三次取平均值,以此降低偶然误差,测定项目包括氨氮 $[\text{NH}_4\text{-N}]$ ,采用酚盐分光光度法(GB/T 8538—1995)、硝氮 $[\text{NO}_3\text{-N}]$ ,采用紫外分光光度法(GB/T 8538—1995)、磷[采用过硫酸钾氧化-钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)],颗粒磷为总磷与溶解磷的差值<sup>[19]</sup>。实验室所

测样品的浓度减去降雨试验所用雨水中养分浓度即为径流中相应养分浓度,并采用IBM SPSS与Microsoft Excel软件进行后期的数据处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地表径流与壤中流产流分析

两次降雨试验均只有10 cm与30 cm的土层汇流槽出现产流。在降雨初期,雨水主要消耗于填洼、下渗、补充土壤缺水量,从降雨到产流存在明显的滞后性,即为初损历时,第一次降雨试验滞后14 min,第二次试验滞后15 min。地表径流产生的同时,部分雨水沿着土壤孔隙开始入渗,在一定条件下会积蓄于相对不透水层上部,形成临时饱和带,引起侧向水流运动,构成壤中流。

根据产流流量与产流历时关系曲线(图2)可知,

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

土层深度 Soil depth/ cm	土壤质地 Soil texture	土壤容重 Soil bulk density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	pH	有机质 Soil organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 Alkali hydrolysable nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total phosphorus/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 Available phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 Total potassium/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available potassium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0~10	粉沙质壤土	1.25	8.0	13.4	0.88	67.5	0.82	13.1	21.5	148.3

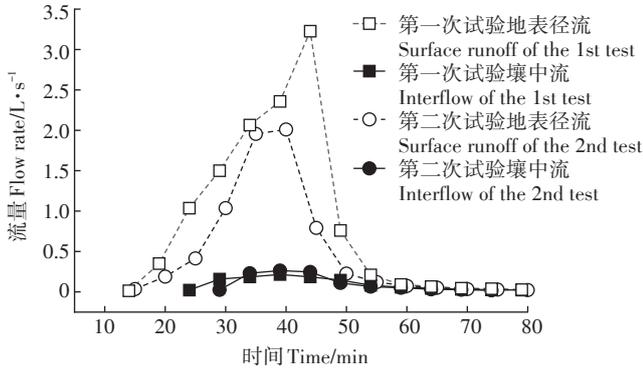


图2 产流流量与产流历时关系

Figure 2 Relationship between runoff yield and runoff duration

地表径流流量变化趋势明显,在产流25 min左右达到峰值,且受雨强影响较大,降雨停止之后地表径流流量迅速下降,总产流时长65 min。壤中流相对稳定,受外界因素影响较小,在第一次降雨试验中,壤中流滞后地表径流历时为10 min,产流15 min左右达到峰值,峰值持续10 min之后开始缓慢下降,产流时长总计45 min。计算前后两次降雨试验的总径流量可知,壤中流在总径流量中所占的比例较小,分别占9.0%与13.1%。壤中流的产流过程与土壤质地密切相关<sup>[20-22]</sup>,试验场土壤砂粒含量高,颗粒粗,比表面积小,粒间大孔隙数量多,土壤通气透水性好,土体内排水通畅,保蓄性差,不易产生托水、内涝和上层滞水,因此壤中流流量较小。

## 2.2 地表径流与壤中流氮浓度变化分析

图3描述了两次降雨试验径流中氨氮、硝氮与可溶性氮浓度随时间的变化。地表径流中氨氮浓度在产流前期较高,变化幅度较大,第一次降雨试验产流开始时地表径流中氨氮浓度( $3.915 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )是壤中流( $2.138 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的1.83倍,产流10 min时浓度降至 $0.615 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,之后逐渐趋于稳定状态。壤中流氨氮浓度变化较为缓慢,在产流15 min之后浓度稳定在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于人工施加肥料的缘故,第二次降雨试验中地表径流与壤中流产流开始时氨氮浓度较施肥前分别提高了12.86倍与16.45倍,远超《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准A标准 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在产流结束时氨氮浓度依旧保持较高水平( $10.46$ 、 $7.112 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),由此可以看出,农田土壤氮素流失对面源污染的贡献不容忽视。硝氮在地表径流中的浓度变化接近于线性,通过SPSS软件进行线性回归得到拟合方程 $y = -1.436x + 181$ , $R^2 = 0.962$ ;壤中流硝氮浓度在产流后5 min内发生骤降,在此之

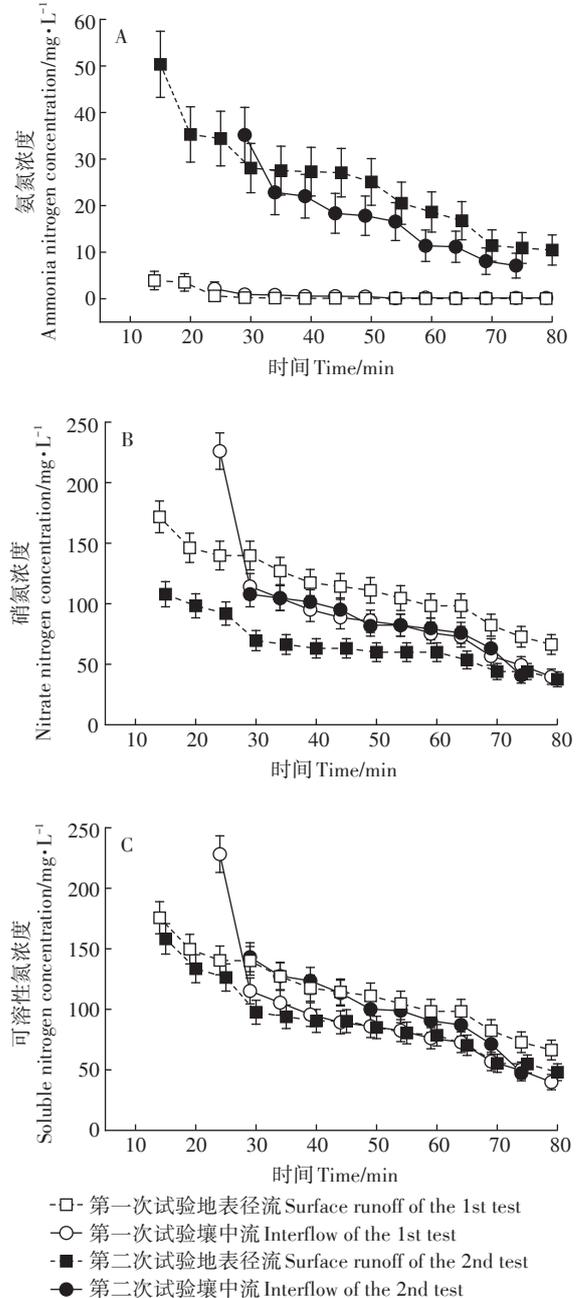


图3 径流中氨氮、硝氮与可溶性氮浓度随时间的变化

Figure 3 Variation of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and soluble nitrogen concentration with time in runoff

后始终低于同时期的地表径流。在第二次降雨径流试验中,硝氮浓度为同时期氨氮浓度的2.14~7.82倍,产流中可溶性氮的输出主要以硝氮为主,这与已有研究成果较为接近<sup>[23]</sup>。土壤中硝氮浓度较高的原因主要是存在硝化作用,氨氮经硝酸细菌和亚硝酸细菌的作用在有氧的条件下转化为硝氮;同时,由于土壤电荷的存在,一般情况下同晶置换、含水氧化硅的解离及 $\text{R-COOH}$ 、 $\text{R-CH}_2\text{-OH}$ 、 $\text{-OH}$ 的解离所产生的负电

荷数量远大于游离的Fe、Al氧化物所形成的正电荷数量,所以大多数土壤带有净负电荷<sup>[24]</sup>,这使得带正电荷氮氮容易被土壤胶体所吸附,而硝氮带负电荷易于淋溶流失<sup>[4]</sup>,多种原因综合导致了径流中硝氮浓度高于氨氮浓度。根据图3C所示,第一次降雨试验中壤中流可溶性氮的浓度在产流前期经历了骤减,由 $228.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $115.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,降幅达49.5%,随着土壤中氮素在冲刷和淋溶的作用下不断减少,壤中流中可溶性氮浓度也不断降低,之后曲线下降趋势变缓,呈现近似线性变化,下降速率约为 $1.381 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $R^2=0.973$ ),这是硝氮在可溶性氮中所占比例较大的原因,地表径流可溶性氮浓度的变化趋势与硝氮基本一致,所以如何有效控制产流初期硝氮的流失是减小壤中流氮素流失的关键。

在第一次降雨试验中地表径流可溶性氮浓度整体上大于壤中流,而在第二次降雨试验中壤中流可溶性氮的浓度大于地表径流,这与试验前预想存在差异。在第一次人工模拟降雨径流试验结束之后第4 d (2019年4月7日)发生自然降雨,实验场雨量计记录累计降雨量12 mm,试验田径流收集槽未见径流产生。根据樊军等<sup>[25]</sup>所做旱地农田土壤剖面硝态氮累积的研究结果表明,降水的分布不均与大量氮肥的投入是旱地土壤硝态氮累积发生的必要条件,杨学云等<sup>[26]</sup>利用18年长期定位试验研究了冬小麦-夏玉米轮作制度下有机-无机肥配合施用对壤土剖面硝氮分布累积和阶段性移动影响的研究结果也显示土壤剖面中硝氮的总量与氮肥施用量直接相关,而作物对化肥氮的利用率与施肥量呈相反趋势,其他学者<sup>[27-29]</sup>

的有关硝氮累积的研究结果与之相似。本次研究中第一次降雨试验开始时间是三月份,在此之前处于冬春交替季节,是华北平原典型的干旱时节,气候干燥少雨,根据实验场管理记录显示,在2018年实验场经过一季秋作物种植,上季种植过程中施用的未被作物吸收的硝氮在土壤中经过了几个月的积累,导致了第一次降雨径流中硝氮浓度的偏高;两次试验间隔中的自然降雨虽并未有产流发生,但仍对土壤中氮的迁移产生了影响,氨氮与硝氮对其敏感度不同,该次试验中自然降雨对氨氮的影响程度较小,对硝氮的影响程度较大。由于硝氮与土壤颗粒存在排斥作用,具有更大的移动性,且极易溶于水,土壤中部分水溶性较强的氮素易随水分向下迁移,渗入到深层土壤和地下水中,目前已有研究指出,农业面源氮素淋失是导致地下水硝酸盐污染的主要原因<sup>[30-33]</sup>,这些研究成果与本次试验所呈现的结果相近。不同地区氮素的流失受水文特征的影响较大,华北地区是我国重要的粮食生产基地,氮肥施用量巨大,在夏季汛期短历时强降雨过后将会导致河流及地下水中硝氮含量激增,由此可见,在不同地区因地制宜设置科学施肥比例,施用适宜的氮肥用量,是防控华北地区非点源污染农田硝氮流失的有效措施。

### 2.3 地表径流与壤中流磷浓度变化分析

图4为两次试验地表径流与壤中流磷(总磷、溶解磷与颗粒磷)浓度变化曲线,相较于氮素的流失,磷元素在地表径流与壤中流中的含量都很低。磷元素易被土壤颗粒固定,多以颗粒态存在于土壤中,难以被地表径流与壤中流带出。由图4可知,地表径流与

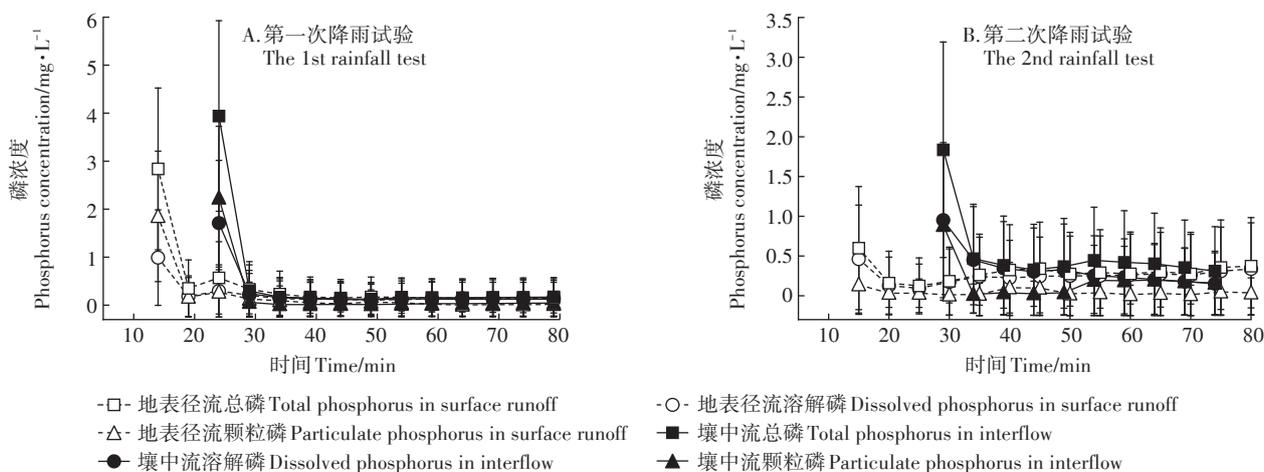


图4 径流中磷浓度随时间的变化

Figure 4 Variation of phosphorus concentration with time in runoff

壤中流总磷浓度随产流时间变化趋势大致相似,在产流后0~15 min内迅速降低,随后虽存在一定的波动,但总体趋于稳定,这与陈玲等<sup>[34]</sup>所做的黄棕壤坡耕地径流养分输出机制的研究结果一致。

第一次降雨试验地表径流中总磷的浓度在产流开始时为 $2.839 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,产流5 min后骤降至 $0.350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,降雨开始时对土壤的冲刷强度较大,雨滴溅蚀破坏土壤团聚体结构,分散表层土壤,土壤颗粒被初期径流卷携<sup>[35-36]</sup>,径流中泥沙颗粒含量较高,导致初始产流中磷浓度偏高。从图4A可知,地表径流总磷浓度在产流10 min时存在一个小峰值,短暂的回升后再次下降,在产流25 min之后趋于稳定,直至产流结束,溶解磷与颗粒磷的分布情况基本相似;壤中流初始产流中总磷浓度较高,在产流10 min时降至 $0.167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,之后一直稳定在该水平。由于在初期降雨结束之后,雨水对裸地地面的冲刷基本稳定,同时土壤表层被压实并形成水膜,使得被径流带出的颗粒物和磷素浓度也基本稳定<sup>[37]</sup>。第二次降雨试验中地表径流初始产流总磷的浓度为 $0.599 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,低于第一次试验,在产流后10 min总磷浓度一直呈下降趋势,之后地表径流总磷含量开始一定程度的回升,直至产流30 min时上升至 $0.341 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;由于人工施肥的缘故,在后期冲刷稳定的情况下,径流卷携出相同质量的颗粒物所携带的磷素增加,施肥后地表径流在产流20 min后总磷浓度始终高于施肥前水平;壤中流磷浓度在经历骤降之后保持平稳状态,且同样高于施肥前水平。从图4两次试验总磷浓度随时间的变化可知,壤中流产流初期溶解磷、颗粒磷与总磷浓度均高于地表径流,在产流后期浓度稳定之后,施肥前壤中流总磷浓度与地表径流基本一致,而施肥后壤中流总磷浓度始终大于施肥前水平,由此可以看出,在长历时产流中通过壤中流流失的磷素量不可忽视。

#### 2.4 累积产流量与累积氮磷流失量关系分析

图5是两次降雨试验累积产流量与累积氮磷流失量的拟合图。从图5A~图5D散点图的分布可以看出,累积可溶性氮流失量和累积产流量之间存在明显的线性趋势,运用SPSS软件进行拟合得到其拟合方程及 $R^2$ ,拟合优度均在0.99以上,存在极显著相关关系,这与田坤等<sup>[38]</sup>所做降雨径流条件下土壤溶质迁移过程模拟的研究结论相一致。结合图2产流流量与产流历时关系曲线可知,产流后0~35 min是累积产流量快速增长期,由于存在极显著线性关系,因此产流后0~35 min是累积氮流失量较快的时段,且流量

时间曲线的峰值在25~30 min,则相应的累积氮流失速度的峰值也在产流后25~30 min。从拟合方程的斜率来看,地表径流与壤中流存在一定的差距,说明地表径流与壤中流累积产流量对累积氮流失量的影响程度存在一定的差别。如图5E~图5H为累积产流量与累计磷流失量的关系分布,根据散点图的分布用幂函数 $y=ax^b$ 拟合其变化趋势, $R^2$ 均在0.97以上,王全九等<sup>[13]</sup>所做的不同植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失影响的研究结果显示,幂函数比指数函数能更好地描述水溶性磷浓度的变化过程,彭梦玲等<sup>[39]</sup>的裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟的研究结论显示养分流失与坡面产流量具有较强的线性相关性,与产沙量呈显著的幂函数关系,这与该次试验的拟合结果相吻合。由拟合曲线的走势可知,产流后0~25 min累积磷素流失量就已达达到整个降雨产流过程总累计流失量的一半以上,这表示在产流初期径流对累积磷流失量的贡献远大于产流后期。从图5A~图5H中拟合方程相关程度可以看出,降雨后累积产流量与土壤中养分流失量之间存在较高水平的相关关系,当得知某次降雨之后的径流总量时,结合当前农田施肥管理可以采用图5中的方程估算该次降雨中冀南地区农田土壤的氮磷流失量,这为冀南地区的土壤养分流失提供了一种较为简便的计算方法,对定量预测该地区的污染源污染有重要价值。

### 3 结论

(1)通过室外大田人工降雨试验研究,在降雨强度 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,冀南地区农田地表径流与壤中流产流过程存在明显差异,地表径流产流过程波动明显,在降雨停止之后流量迅速下降;壤中流产流晚于地表径流,流量变化较为平缓且具有一定的滞后性,壤中流在总径流量中的比例较小,两次降雨试验中分别占9.0%与13.1%。

(2)地表径流与壤中流中氮素浓度在产流初期较高,随后迅速衰减,且径流中硝氮浓度远大于氨氮浓度,产流中可溶性氮的输出以硝氮为主,径流中硝氮浓度大小受溶解度的影响,主要是其溶解态随径流迁移,产流后0~35 min是累积氮流失量较快的时段,两次降雨试验中硝氮累积流失量占总可溶性氮累积流失量的71.0%~99.7%,且硝氮的流失易受水文因素的影响,设置合理氮肥施用标准是防控硝氮流失的关键;累积径流量与累积可溶性氮流失量之间存在极显

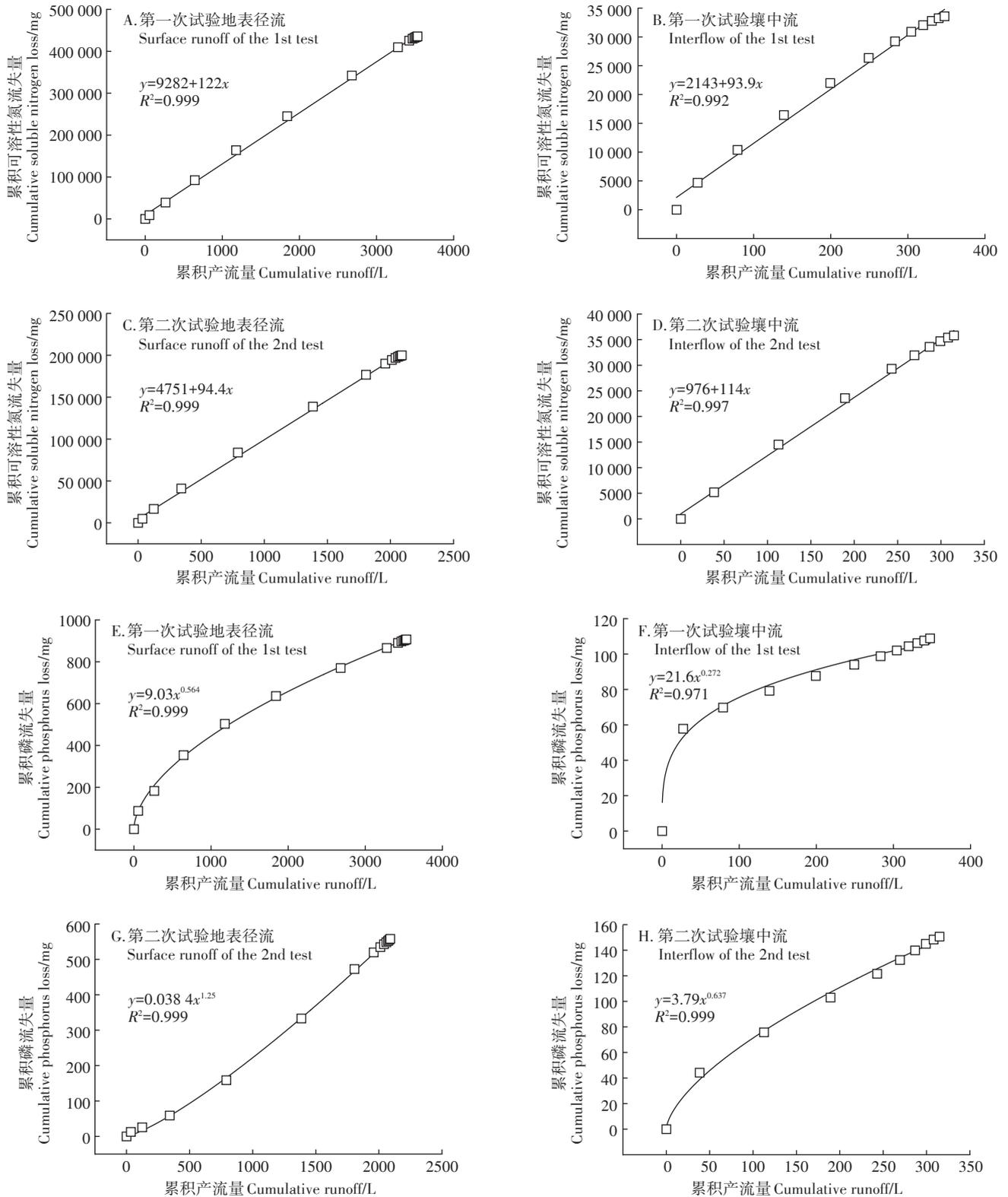


图5 累积产流量与累积氮磷流失量的关系

Figure 5 Relationship between cumulative yield and cumulative nitrogen and phosphorus loss

著线性相关关系,  $R^2$ 均在0.99以上。

(3)两次试验中地表径流与壤中流中总磷浓度随产流时间变化趋势大致相似,在产流后15 min内迅速

降低,随后存在一定的波动,然后趋于稳定;磷元素多以颗粒态存在于土壤中,相较于氮素的流失,磷元素在地表径流与壤中流中的含量较低,并且随着产流时

间的延长,壤中流逐渐成为磷素流失的主要途径;累积径流量与累积磷流失量之间可用幂函数进行拟合,拟合优度在0.971~0.999,拟合方程为预测冀南地区农田磷素累积流失量提供了简便的计算方法。

#### 参考文献:

- [1] 郝韶楠,李叙勇,杜新忠,等.平原灌区农田养分非点源污染研究进展[J].生态环境学报,2015,24(7):1235-1244.  
HAO Shao-nan, LI Xu-yong, DU Xin-zhong, et al. A review on non-point source nutrient pollution of irrigation plain areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1235-1244.
- [2] Liu R, Wang Q, Xu F, et al. Impacts of manure application on SWAT model outputs in the Xiangxi River watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 479-488.
- [3] Ahmad Z U, Sakib S, Gang D D. Nonpoint source pollution[J]. *Water Environment Research*, 2016, 88(10): 1594-1619.
- [4] Bai Z, Lu J, Zhao H, et al. Designing vulnerable zones of nitrogen and phosphorus transfers to control water pollution in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(16): 8987-8988.
- [5] Wu Y, Liu J, Shen R, et al. Mitigation of nonpoint source pollution in rural areas: From control to synergies of multi ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1376-1380.
- [6] Karimi R, Akinremi W, Flaten D. Nitrogen- or phosphorus-based pig manure application rates affect soil test phosphorus and phosphorus loss risk[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111(2/3): 217-230.
- [7] 钟雄,张丽,张乃明,等.滇池流域坡耕地土壤氮磷流失效应[J].水土保持学报,2018,32(3):42-47.  
ZHONG Xiong, ZHANG Li, ZHANG Nai-ming, et al. Soil N and P loss in slope farmland of Dianchi watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 42-47.
- [8] Xu X, Tan Y, Yang G. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth-science Reviews*, 2013, 124(9): 115-125.
- [9] 欧阳威,刘迎春,冷思文,等.近三十年非点源污染研究发展趋势分析[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2234-2241.  
OUYANG Wei, LIU Ying-chun, LENG Si-wen, et al. An analysis of research trends about non-point source pollution over the last three decades[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2234-2241.
- [10] Xing W, Yang P, Ren S, et al. Slope length effects on processes of total nitrogen loss under simulated rainfall[J]. *CATENA*, 2016, 139: 73-81.
- [11] 张丹,杨洪霞,段慧,等.我国非点源污染的基本特征与时空分布规律研究综述[J].四川环境,2014,33(4):140-145.  
ZHANG Dan, YANG Hong-xia, DUAN Hui, et al. Study on the basic characteristics and spatial and temporal distribution regularities of non-point source pollution in China[J]. *Sichuan Environment*, 2014, 33(4): 140-145.
- [12] 邹燕虹,张丽萍,陈儒章,等.坡长和雨强对氮素流失影响的模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2017,31(2):7-12.  
WU Yan-hong, ZHANG Li-ping, CHEN Ru-zhang, et al. Research on the effect of slope length and rainfall intensity on nitrogen loss in sloping land under artificially simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 7-12.
- [13] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产生沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.  
WANG Quan-jiu, ZHAO Guang-xu, LIU Yan-li, et al. Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 195-201.
- [14] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J].水土保持学报,2014,28(6):41-45.  
ZHENG Hai-jin, HU Jian-min, HUANG Peng-fei, et al. Comparative study of nitrogen and phosphorus through surface flow and interflow on red soil farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 41-45.
- [15] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.  
WANG Li, WANG Li, WANG Quan-jiu. The processes of nitrogen and phosphorus loss and migration in slope cropland under different slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 69-75.
- [16] 国家统计局.中国统计年鉴-2018[M].北京:中国统计出版社,2018.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook-2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [17] 李保敏.邯郸市2016年“7·19”特大暴雨洪水特性分析[J].海河水利,2017(2):32-37.  
LI Bao-min. Analysis on the characteristics of "7·19" torrential rain flood in Handan City in 2016[J]. *Haihe Water Resources*, 2017(2): 32-37.
- [18] 梁新强,田光明,李华,等.天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J].水土保持学报,2005,19(1):59-63.  
LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 59-63.
- [19] 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.  
LU Ru-kun. Soil argrochemistry analysis protocols[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [20] 谢颂华,涂安国,莫明浩,等.自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J].水科学进展,2015,26(4):526-534.  
XIE Song-hua, TU An-guo, MO Ming-hao, et al. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 526-534.
- [21] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等.紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2017,31(5):25-31.  
LI Xin-xin, WANG Xiao-yan, CAI Chong-fa, et al. Response of soil

- water content and subsurface flow to rainfall intensity in purple soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):25-31.
- [22] Dahlke H E, Easton Z M, Lyon S W, et al. Dissecting the variable source area concept—subsurface flow pathways and water mixing processes in a hillslope[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 125-141.
- [23] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(4): 337-342.  
XI Jin-gen, ZHOU Jian-bin, ZHAO Man-xing, et al. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(4): 337-342.
- [24] 胡筱敏. 环境学概论[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.  
HU Xiao-min. General environmental sciences[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010.
- [25] 樊军, 郝明德. 旱地农田土壤剖面硝态氮累积的原因初探[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3):263-266.  
FAN Jun, HAO Ming-de. Nitrate accumulation in soil profile of dry-land farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 263-266.
- [26] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2):134-138.  
YANG Xue-yun, ZHANG Shu-lan, YUAN Xin-min, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 134-138.
- [27] 李晓欣, 胡春胜, 程一松. 不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮累积的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3):38-42.  
LI Xiao-xin, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song. Effects of different fertilizers on crop yields and nitrate accumulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3):38-42.
- [28] 翁玲云, 杨晓卡, 吕敏娟, 等. 长期不同施氮量下冬小麦-夏玉米复种系统土壤硝态氮累积和淋洗特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2551-2558.  
WENG Ling-yun, YANG Xiao-qia, LYU Min-juan, et al. Characteristics of soil nitrate accumulation and leaching under different long-term nitrogen application rates in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2551-2558.
- [29] 倪玉雪. 中国农田土壤硝态氮累积、淋洗与径流损失及 $\text{N}_2\text{O}$ 排放[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.  
NI Yu-xue. Nitrate accumulation, leaching, runoff and oxide emissions in agricultural soil of China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.
- [30] 董坤. 不同施肥模式对蔬菜地中氮素流失影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
DONG Kun. Effects of different fertilizer modes on nitrogen loss in vegetable field[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [31] 何佳吉, 余钟波, 向龙, 等. 改良灌溉施肥方式下硝态氮流失的模拟研究[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(8):1779-1782.  
HE Jia-ji, YU Zhong-bo, XIANG Long, et al. Simulation study on nitrate nitrogen loss under improved irrigation and fertilization mode[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2013, 52(8):1779-1782.
- [32] 任秀文, 李开明, 刘爱萍, 等. 模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013(增刊1):119-124.  
REN Xiu-wen, LI Kai-ming, LIU Ai-ping, et al. Characteristics of nitrate nitrogen loss on red soil slope under simulated rainfall conditions [J]. *China Environmental Science*, 2013(Suppl 1):119-124.
- [33] 贾海燕, 雷阿林, 雷俊山, 等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10):1658-1664.  
JIA Hai-yan, LEI A-lin, LEI Jun-shan, et al. Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil: A simulation study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10):1658-1664.
- [34] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(6):2151-2158.  
CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow brown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6):2151-2158.
- [35] Roth C H, Eggert T. Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 1994, 32(2/3):253-268.
- [36] Shainberg I, Levy G J, Rengasamy P, et al. Aggregate stability and seal formation as affected by drops' impact energy and soil amendments[J]. *Soil Science*, 1992, 154(2):113-119.
- [37] 袁溪, 潘忠成, 李敏, 等. 雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10):3099-3106.  
YUAN Xi, PAN Zhong-cheng, LI Min, et al. Influence of rainfall intensity and slope gradient on suspended substance and phosphorus losses in runoff[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 3099-3106.
- [38] 田坤, Huang C H, 王光谦, 等. 降雨-径流条件下土壤溶质迁移过程模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4):81-87.  
TIAN Kun, Huang Chi-hua, WANG Guang-qian, et al. Movement of soil solute under simulated rainfall runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4):81-87.
- [39] 彭梦玲, 吴磊, 乔闪闪. 不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3):1109-1116.  
PENG Meng-ling, WU Lei, QIAO Shan-shan. Coupling simulation of runoff-sediment-nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science of China*, 2018, 38(3):1109-1116.