

王 月, 房云清, 纪 婧, 等. 不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 814-821.

WANG Yue, FANG Yun-qing, JI Jing, et al. The loss of nitrogen and phosphorus from dryland farmland under different rainfall intensities[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 814-821.

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王 月, 房云清, 纪 婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东*

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘 要:为阐明旱地农田径流氮磷流失规律,以种植空心菜的旱地为研究对象,采用人工模拟降雨方式,设计10、15、25 mm·h⁻¹三个降雨强度,研究不同雨强下旱地氮磷流失特征和径流拦截效果。结果表明:在相同降雨量条件下,旱地径流量随降雨强度的增大而增加,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下产生的径流总量分别为197.07、381.92、649.45 m³·hm⁻²,对应的径流系数分别为0.20、0.38、0.65。总氮(TN)浓度变化随产流时长呈现出先上升后下降的趋势,峰值明显,氮的流失形态以硝酸盐氮(NO₃-N)为主;TN流失量随着降雨强度的增大而增加,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下分别为0.67、2.48、9.74 kg·hm⁻²。总磷(TP)流失浓度随降雨强度的增大而降低,流失过程相对平缓,磷的流失形态以颗粒态磷(PP)为主;10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TP流失量分别为0.061、0.050、0.030 kg·hm⁻²。通过田间沟渠水位的管控,可有效减少TN的径流排放,不同雨强下减少比例分别为100.00%、63.56%、33.98%。研究表明,氮的拦截是控制旱地面源污染的重点,在拦截能力有限的情况下,选择污染负荷较高的时段可有效提高面源污染拦截效果。

关键词:降雨强度;旱地;氮磷;径流流失

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)06-0814-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0210

The loss of nitrogen and phosphorus from dryland farmland under different rainfall intensities

WANG Yue, FANG Yun-qing, JI Jing, QIN Yi-feng, MA Rui-jun, LI Xu-dong*

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To investigate the loss pattern of N and P in dryland farmland runoff, artificial simulated rainfall runoff experiments were carried out on a dryland farmland that grew spinach. The experiments were conducted under rainfall intensities of 10, 15 and 25 mm·h⁻¹ in order to analyze N and P loss characteristics and runoff interception effective for dryland under different rainfall intensities. The results indicated that the runoff yield of dryland farmland increased with the increasing rainfall intensity under the same rainfall. The runoff yields under the 10, 15, and 25 mm·h⁻¹ rainfall intensities were 197.07, 381.92 m³·hm⁻² and 649.45 m³·hm⁻², respectively, with the corresponding runoff coefficients of 0.20, 0.38 and 0.65. The concentrations of TN and NO₃-N first increased and then decreased with the time of runoff production, distinct peak values could be observed from the change of concentrations. The nitrogen loss was primarily in the form of NO₃-N. The loss of concentration of TN rose with increasing rainfall intensity, the losses were 0.67, 2.48 kg·hm⁻² and 9.74 kg·hm⁻² under 10, 15 and 25 mm·h⁻¹ rainfall intensities, respectively. However, the loss of concentration of TP decreased gradually with the increasing rainfall intensity. Particulate phosphorus was the main form in the phosphorus loss. The TP loss were 0.061, 0.050 kg·hm⁻² and 0.030 kg·hm⁻² under 10, 15 and 25 mm·h⁻¹ rainfall intensities. TN discharge could be effectively reduced by controlling the field ditch water level. The reduction rates under 10, 15 and 25 mm·h⁻¹ rainfall intensities were 100.00%, 63.56% and 33.98%, respectively. The results indicate that nitrogen interception is the key element of the dryland farmland runoff control. When the effectiveness of the interception is limited, the interception effect of non-point source pollution can be improved by choosing to intercept the period with high pollution load.

Keywords: rainfall intensity; dry land; nitrogen and phosphorus; runoff loss

收稿日期:2018-08-16 录用日期:2018-10-23

作者简介:王 月(1992—),男,河北衡水人,硕士研究生,从事农田面源污染方面的研究。E-mail:wang-yue@sjtu.edu.cn

*通信作者:李旭东 E-mail:lixudong@sjtu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800500)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0800500)

氮磷是植物生长所必需的养分,是与农作物产量密切相关的营养元素。然而在农业生产过程中,氮磷肥的不合理施用会造成严重的水环境污染问题。诸多污染调查结果^[1-3]表明,我国湖泊、水库等地表水体中的氮磷大部分来自农业面源污染。第一次全国污染源普查公报^[4]显示,种植业总氮(TN)年流失量为159.78万t,总磷(TP)年流失量为10.87万t,分别占农业源的59.08%和38.18%,主要原因是农田中的肥料仅有一部分为农作物所利用,其中氮素利用率约为40%~50%,磷素利用率约为10%~20%,其余大部分被农田排水和地表径流携带至天然水体中,造成水体富营养化等水环境问题^[5]。因此,农田氮磷的流失已经成为天然水体中氮磷的重要来源^[6]。截至2015年末,我国共有旱地农田6673万hm²,占全部耕地的49.43%^[7]。旱地因其表面不蓄水,每次降雨产生的径流直接排出,导致大量的氮磷随之流失。有研究表明旱地氮磷流失对水体的污染贡献率达到20%~50%^[8]。

农田氮磷的流失除了受降雨量、土壤类型、农田坡度、农作物类型等影响外,还与降雨强度密切相关,由于产流量和产流模式的差异性,不同强度降雨所引发的旱地氮磷流失特征有所不同^[9]。目前国内外已开展关于降雨强度对农田氮磷流失影响的研究,陈晓安等^[10]研究了30、60、90 mm·h⁻¹雨强对坡耕地地表径流和壤中流的影响;罗春燕等^[11]研究了60、105、135 mm·h⁻¹雨强对紫色土间作玉米条件下坡耕地土壤氮、磷、钾养分流失的影响;冯国禄等^[12]研究了17.4、48、60 mm·h⁻¹雨强和滞水时间对稻田氮磷的减排效能;潘忠成等^[13]探讨了不同雨强(30、50、65、100 mm·h⁻¹)和坡度(0°、5°、10°)下黏质土坡面土壤氮素流失过程。这些研究关注的雨强多在30 mm·h⁻¹以上,研究的对象则以坡耕地和大田作物为主,有关中小雨强降雨对农田,尤其是对旱地菜田氮磷流失影响的研究报道较少。我国旱田作物中蔬菜种植面积稳定在2000万hm²以上,占整个旱地种植的29.70%。本研究以旱地中的菜田为对象,在中小雨强下研究其氮磷的流失规律,并在此基础上有针对性地提出氮磷减排方案,对旱田面源污染防控具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于上海市闵行区,121°26′25″E、31°02′06″N,海拔8 m,气压106.09 kPa,属亚热带季风气候区,全年雨量适中,四季分明,年均气温14.2~21.9℃,

最高月平均气温为36℃,年均降水量1 123.7 mm,年均降雨天数为170 d,主汛期(5—6月)年均水面蒸发量约为1 336.6 mm,日照时数为1 649.5 h,平均无霜期为228 d。

1.2 试验材料与方法

1.2.1 试验装置与材料

旱地径流模拟系统由旱地模拟装置、人工降雨模拟装置和遮雨棚3部分组成。其中旱地模拟装置主体为4.50 m×3.50 m×0.50 m不锈钢槽,槽内共设三条垄,垄宽1.00 m、垄长4.00 m、垄高0.40 m。垄间沟渠长4.00 m、宽0.25 m、高0.30 m,两侧排水沟渠长3.50 m、宽0.25 m、高0.30 m,排水口分布于排水沟渠末端,如图1所示。人工降雨模拟装置采用NLJY-CPSN-10型侧喷式人工模拟降雨器,由降雨器、给水箱、储水箱、控制器、雨量计等部分组成,降雨高度4.00 m,利用NLJY-10型降雨控制软件液晶显示雨强值和雨

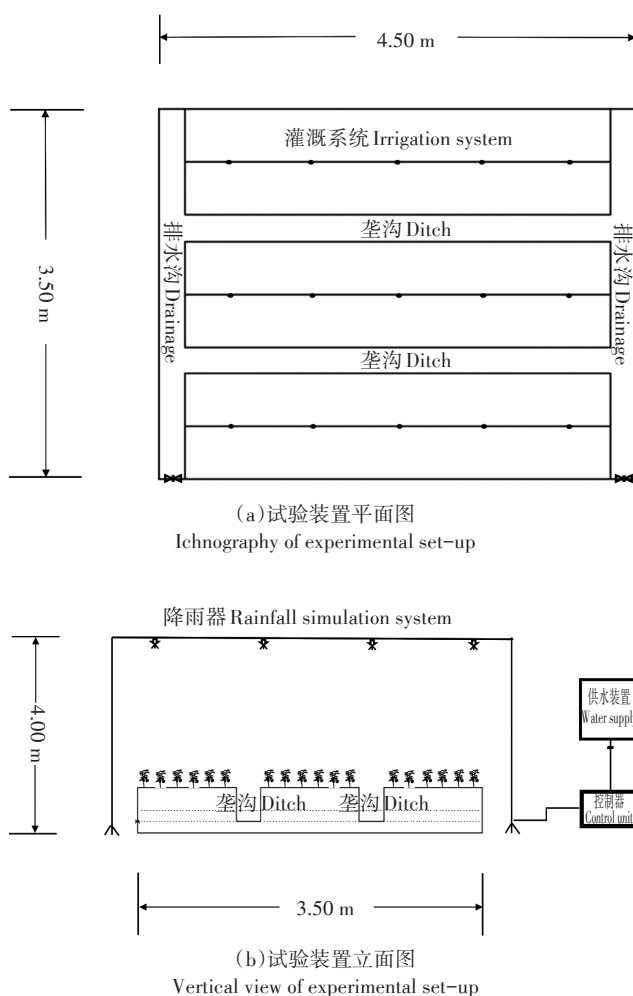


图1 试验装置图

Figure 1 Experimental set-up

强曲线。人工模拟降雨水源为自来水。

试验所用土壤就地采集,土壤类型为砂壤土。土壤主要理化性质见表1。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 The physicochemical properties of the tested soil

项目 Items	数值 Value
pH	7.16
全氮 Total N/g·kg ⁻¹	1.3±0.1
碱解氮 Alkaline N/mg·kg ⁻¹	138.3±5.1
全磷 Total P/mg·kg ⁻¹	816.7±8.4
有效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	24.0±0.8
全钾 Total K/g·kg ⁻¹	1.6±0.1
有效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	149.3±8.0
有机质 TOC/g·kg ⁻¹	20.0±0.3
阳离子交换量 CEC/cmole·kg ⁻¹	13.45±0.01
土壤颗粒组成	砂粒 Sand
Soil particle composition/%	粉粒 Silt
	黏粒 Clay

1.2.2 试验管理与运行

受试旱地种植空心菜,种植间距为15 cm×15 cm。种植前按120 kg·hm⁻²硝态氮肥和60 kg·hm⁻²速效磷肥的标准浅施化肥作为底肥。试验装置位于户外,期间如遇自然降雨,用遮雨篷布完全遮盖,以避免干扰。试验在同一地块进行,各雨强试验间隔约2周。每次试验后对试验区土壤氮磷等含量进行测定,根据土壤氮磷含量适量补施化肥,使土壤氮磷含量与第一次试验条件基本一致后,再进行下一雨强试验。试验时,首先在储水箱中注满自来水,然后调试降雨装置使其达到预期雨强,试验过程中实时监测雨强的变化,达到预期降雨量后及时关闭降雨装置,停止降雨。

本试验重点研究中小雨强(<30 mm·h⁻¹)下旱地

菜田氮磷流失规律,共设置10、15、25 mm·h⁻¹三个雨强进行试验。预试验表明,25 mm以下降雨量时,旱地基本不产生径流,随着降雨量的增大,产流时间和产流量增加,为能更好地反映氮磷流失规律,试验中将降雨总量设置为100 mm。

1.2.3 水样采集与测定

于沟渠总出口处取样,有产流时开始采样,采样间隔根据产流情况适当调整,产流前期采样频率较高,每5~10 min取样一次;后期随着径流的减少采样频次逐渐减少,每20~30 min取样一次。每次取样100 mL,同步记录采样时间。水样采集后当日进行测定或在4℃条件下保存于冰箱中,在24 h内进行测定。检测项目主要包括:流量、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)和颗粒态磷(PP)等。其中,流量的测定采用体积/时间法,TN的测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法,NO₃⁻-N的测定采用紫外分光光度法,NH₄⁺-N的测定采用纳氏试剂比色法,TP和PP的测定采用钼酸铵分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 降雨强度对产流过程的影响

图2为不同降雨强度下旱地产流特征。由图2可知,径流量随产流时长呈现先增加后减少的趋势,其中雨强为10 mm·h⁻¹和15 mm·h⁻¹时的径流量在整个产流期间相对较为平缓,径流量峰值分别为0.50 m³·min⁻¹·hm⁻²和1.00 m³·min⁻¹·hm⁻²,峰值出现时间为产流开始后约8.6 h和3.5 h,降雨结束后,径流继续维持约2.0 h后结束。而雨强为25 mm·h⁻¹时的径流量变化出现明显的峰值,径流量峰值达到4.00 m³·min⁻¹·hm⁻²,峰值出现时间为产流开始后约2.5 h,降雨结束后,径流继续维持约1.0 h后结束。这是因为10 mm·

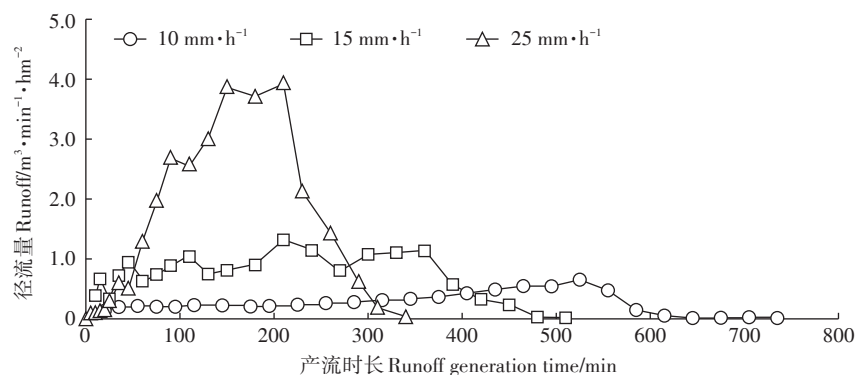


图2 不同降雨强度下旱地产流特征

Figure 2 Curve of dry land runoff yield under different rainfall intensities

h^{-1} 和 $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强较小,产流方式为蓄满产流,降低了产流的发生^[14]; $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强较大,雨滴对土壤的击打能力较强,土壤更容易形成物理性结皮,从而减少了雨水入渗、促进产流^[15]。雨强大,径流峰值产生快,峰值高,降雨结束后,产流消失得也快。由图2还可知,雨强在 10 、 15 、 $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,径流总量分别为 197.07 、 381.92 、 $649.45\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,对应的径流系数分别约为 0.20 、 0.38 和 0.65 ,这说明农田径流量与降雨强度关系明显,在相同降雨量情况下,降雨强度越大,径流产生量越大。

2.2 降雨强度对径流中氮磷浓度的影响

2.2.1 降雨强度对径流中TN浓度的影响

图3为不同降雨强度下径流中TN浓度变化图。由图3可知,径流中TN浓度随产流时长均呈现先上升后下降的趋势,这是因为前期径流量小,TN携带能力弱,随着产流的持续,TN流失增大,因此浓度逐渐上升;降雨结束后径流开始下降,TN流失减小,浓度逐渐下降。 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下这种趋势较为平缓,雨

强越大,TN浓度峰值越明显。这是因为 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强产流低,缓慢的产流速度导致TN浓度的升高具有一定滞后性^[16],浓度上升缓慢。 $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时雨强增大,TN随产流流失加快,导致TN浓度峰值明显。雨强在 10 、 15 、 $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的TN平均浓度分别为 2.76 、 4.82 、 $9.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这表明,随着雨强的增大,TN流失浓度增高。此外,浓度峰值一般出现在流量峰值之前,以 $25\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强为例,TN浓度峰值出现在产流开始后的 2.0 h 左右,而流量峰值出现在产流开始后的 2.5 h 左右,且浓度峰值持续时间较流量峰值持续时间短,这将有利于污染物流失的控制。

2.2.2 降雨强度对径流中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的影响

图4为不同降雨强度下径流中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化图。如图4所示,与TN类似, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度随产流时长也呈现先上升后下降的趋势, 10 、 $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下,径流中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化比较平缓,这是因为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是溶解态氮,易随径流流失, 10 、 $15\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下产流较小,导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的流失浓度较小且趋势平缓。 25

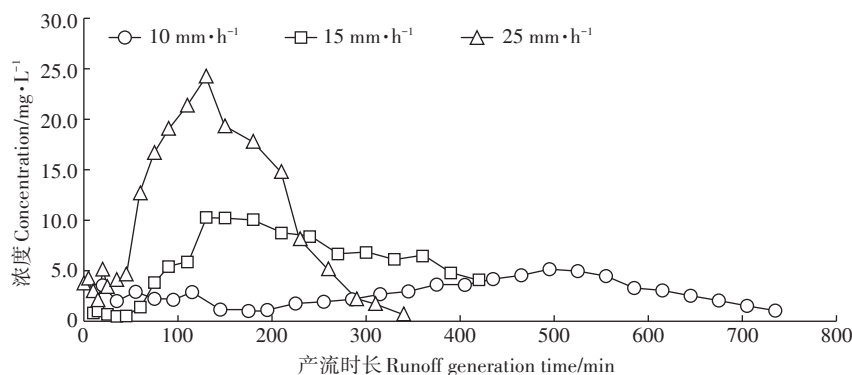


图3 不同降雨强度下径流中TN浓度变化

Figure 3 Variation of total nitrogen concentration in runoff under different rainfall intensities

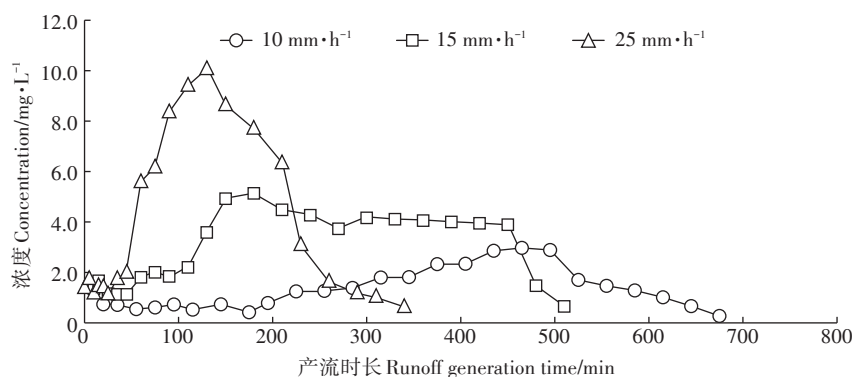


图4 不同降雨强度下径流中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化

Figure 4 Variation of nitrate nitrogen concentration in runoff under different rainfall intensities

$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下, NO_3^- -N 流失浓度出现明显的峰值, 这是因为 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下产流较快, 径流携带 NO_3^- -N 直接排出, 浓度快速增加, 随着产流的持续, NO_3^- -N 不断流失, 再加上径流的稀释作用, 导致浓度快速下降^[17], 因此峰值明显。在 10 、 15 、 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下, NO_3^- -N 平均浓度分别是 1.73 、 3.69 、 $6.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这说明降雨强度越大, NO_3^- -N 流失浓度越高^[18]。

2.2.3 降雨强度对径流中 NH_4^+ -N 浓度的影响

不同降雨强度下径流中 NH_4^+ -N 浓度变化如图 5 所示。 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下, NH_4^+ -N 浓度总体呈上升-下降趋势, 这是因为 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下产生的径流较小, 携带 NH_4^+ -N 的能力较弱, 随着土壤含水率逐渐增大, 产流量增多, NH_4^+ -N 浓度升高, 降雨结束后随着径流的减少, NH_4^+ -N 浓度开始降低。 15 、 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下, NH_4^+ -N 浓度波动较大, 呈现“锯齿状”变化^[19]且产流初始 NH_4^+ -N 浓度偏高, 原因是产流开始时径流携带出的表面土壤颗粒较多, 而 NH_4^+ -N 易于被带有负电荷的土壤吸附, 因此 NH_4^+ -N 浓度较高; 随着产流的持续, 径流量增加, 土壤表面的 NH_4^+ -N 流失减少, NH_4^+ -N

流失浓度下降; 同时, 随着降雨的持续, 表层土壤水分逐渐达到饱和, 径流入渗率减小^[20], 溶出的 NH_4^+ -N 增多, 径流中 NH_4^+ -N 浓度逐渐上升后趋于平稳; 产流后期, 土壤中的 NH_4^+ -N 含量减少, 再加上径流稀释作用, 因此流失浓度减小。在 10 、 15 、 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下, NH_4^+ -N 平均浓度分别是 0.20 、 0.29 、 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这说明 NH_4^+ -N 浓度随降雨强度的增大没有呈现规律性变化, 在整个过程中, NH_4^+ -N 浓度呈现波动性变化。

2.2.4 降雨强度对径流中 TP 浓度的影响

不同降雨强度下径流中 TP 浓度变化如图 6 所示。TP 流失浓度随产流时长总体呈现迅速上升-平缓下降的趋势, 这是因为产流初期径流的冲蚀作用导致 PP 流失较快, 浓度快速上升; 随着降雨持续, 流失的磷能够较快地从土壤中的有机物和矿物质得到补充^[21], 再加上磷素易于被土壤所吸附^[22], 因此虽然 TP 的流失浓度在下降, 但下降速度较为平缓。整个产流过程, TP 的浓度变化一直较为平缓, 波动不大。雨强为 10 、 15 、 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, TP 平均浓度分别为 0.32 、 0.16 、 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明 TP 流失浓度随降雨强度的增

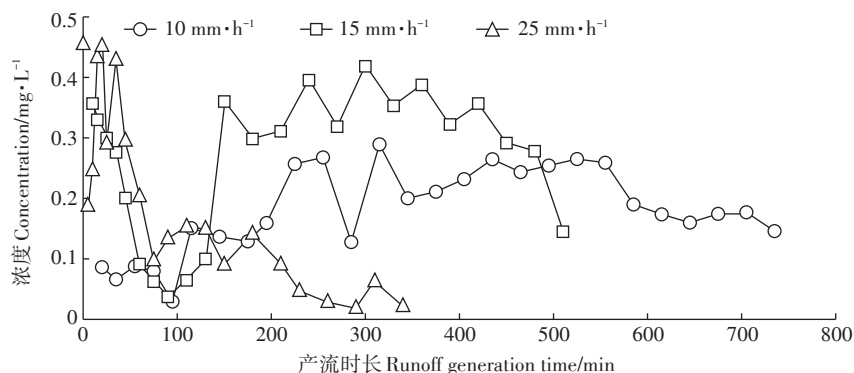


图5 不同降雨强度下径流中 NH_4^+ -N 浓度变化

Figure 5 Variation of ammonium nitrogen concentration in runoff under different rainfall intensities

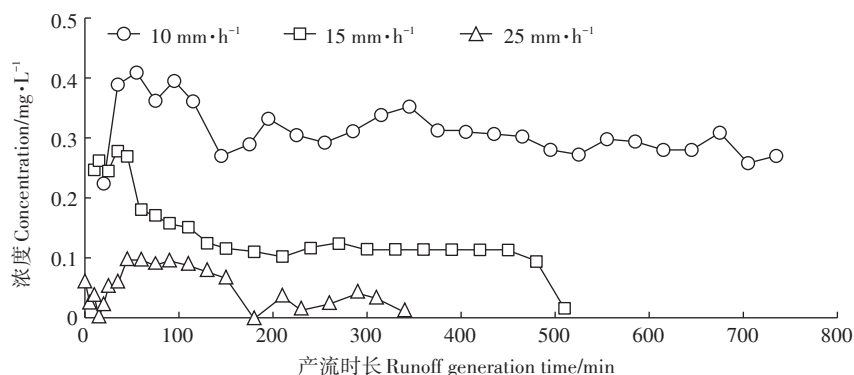


图6 不同降雨强度下径流中 TP 浓度变化

Figure 6 Variation of total phosphorus concentration in runoff under different rainfall intensities

大而降低。

2.3 降雨强度对污染负荷拦截的影响

2.3.1 不同降雨强度下旱地氮磷流失量

不同降雨强度下旱地氮磷流失量见表2。由表2可知,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TN流失量分别为0.67、2.48、9.74 kg·hm⁻²,这表明TN流失量随着降雨强度的增大而增加。氮流失形态中,NO₃⁻-N分别占比50.75%、56.85%和42.40%,NH₄⁺-N分别占比5.97%、4.44%和0.72%,NO₃⁻-N流失比例明显高于NH₄⁺-N,与地表径流中无机氮的流失以NO₃⁻-N为主的结论^[23]一致。10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TP的流失量分别为0.061、0.050、0.030 kg·hm⁻²,这表明TP的流失量随着降雨强度的增大而降低。TP的流失以PP为主,10、15、25 mm·h⁻¹降雨强度下PP流失量分别占TP的93.44%、81.46%和77.34%,原因是试验开始前对土壤进行了翻耕,土壤相对疏松,随着时间的推移和前一场降雨的影响,土壤紧实度增加导致泥沙流失含量减少,PP含量随之减少^[24]。由于TP的流失总量很少,因此,对旱地径流进行拦截时,应以TN的拦截为重点。

2.3.2 不同降雨强度下污染负荷随产流的变化

本试验装置中,沟渠出口处设置了水位调节闸门,可对沟渠水位进行管控,降雨开始后,在不影响作物生长情况下,通过调节闸门将沟渠底部0.10 m作为蓄水空间,每公顷蓄水量可达200.00 m³以上。为了方便探究不同降雨强度下最佳的污染截留方案,以TN为例,对不同降雨强度下污染负荷随产流的变化情况进行了分析,图7是不同降雨强度下TN流失比例随径流量的变化,在10 mm·h⁻¹雨强下,径流总量为197.07 m³·hm⁻²,在本试验中可100%拦截。15 mm·h⁻¹和25 mm·h⁻¹雨强下,径流总量分别为381.97 m³·hm⁻²和649.45 m³·hm⁻²,难以全部截留,因此,考虑部分拦截,最大拦截量设为200 m³·hm⁻²,截留污染负荷较高的时段,在产流分别达到100~300 m³·hm⁻²和300~500 m³·hm⁻²时TN的流失量较大,因此将初期径

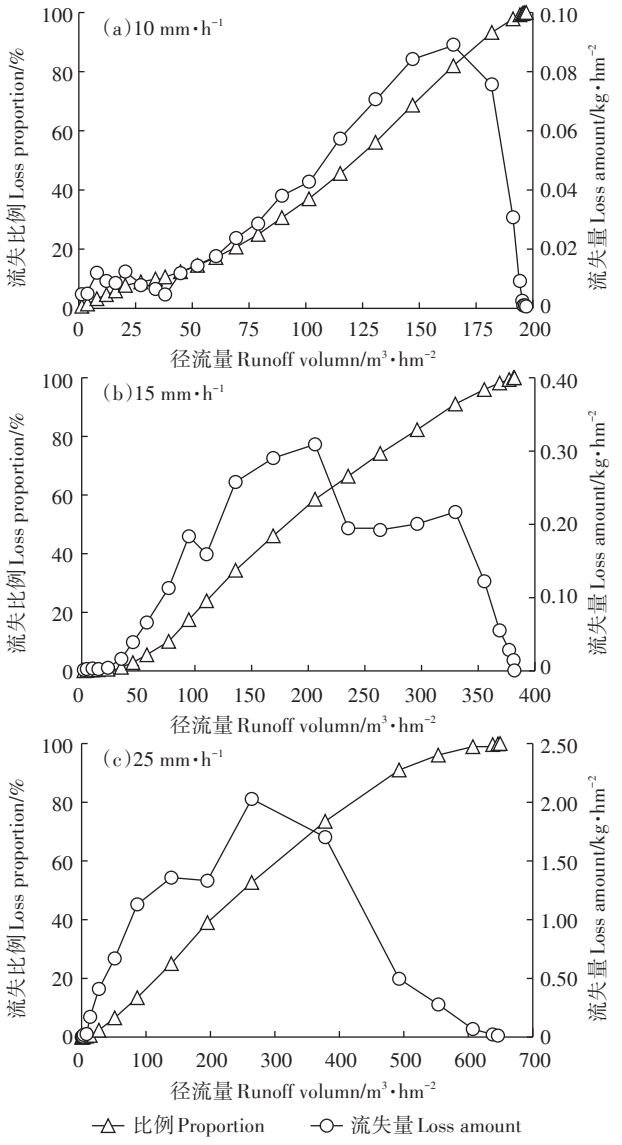


图7 TN流失比例随径流量变化曲线

Figure 7 Proportion of total nitrogen loss changes with runoff volumn variation

流直排,将蓄水空间用于TN流失量大的时段,拦截效果分别可达到63.56%和33.98%。TN的主要流失区间随径流量的增加而推移,拦截比例随径流量的增加

表2 不同降雨强度下氮磷流失量

Table 2 Nitrogen and phosphorus losses under different rainfall Intensities

雨强 Rainfall intensity/ mm·h ⁻¹	径流量 Runoff volume/ m ³ ·hm ⁻²	TN 流失量 TN loss amount/ kg·hm ⁻²	NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		TP 流失量 TP loss amount/ kg·hm ⁻²	PP	
			流失量 Loss amount/ kg·hm ⁻²	占总氮比例 Proportion of TN/%	流失量 Loss amount /kg·hm ⁻²	占总氮比例 Proportion of TN/%		流失量 Loss amount/ kg·hm ⁻²	占总磷比例 Proportion of TP/%
10	197.07	0.67	0.34	50.75	0.04	5.97	0.061	0.057	93.44
15	381.92	2.48	1.41	56.85	0.11	4.44	0.050	0.040	81.46
25	649.45	9.74	4.13	42.40	0.07	0.72	0.030	0.023	77.34

而降低。

3 结论

(1)旱地径流量随降雨强度增大而增加,在100 mm降雨量条件下,10、15、25 mm·h⁻¹降雨强度产生的径流总量分别为197.07、381.92、649.45 m³·hm⁻²,对应的径流系数分别为0.20、0.38、0.65。

(2)旱地径流中,TN浓度随产流时长呈现出先上升后下降的趋势,峰值明显,氮的流失形态以NO₃-N为主;TN流失量随着降雨强度的增大而增加,100 mm降雨量时,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TN流失总量分别为0.67、2.48、9.74 kg·hm⁻²。TP浓度随降雨强度的增大而降低,流失过程相对平缓,磷的流失以PP为主;100 mm降雨量时,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TP流失总量分别为0.061、0.050、0.030 kg·hm⁻²。

(3)控制旱地径流,氮的拦截是重点。通过对田间沟渠水位的管控,10、15、25 mm·h⁻¹雨强下TN的拦截率分别可达100.00%、63.56%、33.98%。

参考文献:

- [1] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等.农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4):81-84.
LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4):81-84.
- [2] 张维理,冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅱ. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1018-1025.
ZHANG Wei-li, JI Hong-jie, Kolbe H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies II. Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1018-1025.
- [3] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-8.
- [4] 环境保护部,国家统计局,农业部.第一次全国污染源普查公报[R]. 北京:环境保护部,国家统计局,农业部, 2010.
Ministry of Environmental Protection, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The first national pollution source census bulletin[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2010.
- [5] 艾小凡,王鹤立,陈祥龙.地下水硝酸盐污染生物修复中的亚硝态氮积累研究[J]. 环境工程, 2014, 32(1):33-36.
AI Xiao-fan, WANG He-li, CHEN Xiang-long. Experiment research on the problem of nitrite accumulation in groundwater during biological denitrification[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(1):33-36.
- [6] Sun B, Zhang L, Yang L, et al. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures[J]. *AMBIO*, 2012, 41(4):370-379.
- [7] 自然资源部.中国国土资源公报[R]. 北京:自然资源部, 2016.
Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. China land and resources bulletin[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, 2016.
- [8] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1):1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.
- [9] Franklin D, Truman C, Potter T, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3):846-854.
- [10] 陈晓安,杨洁,汤崇军,等.雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9):141-146.
CHEN Xiao-an, YANG Jie, TANG Chong-jun, et al. Effects of rainfall intensity and slope on surface and subsurface runoff in red soil slope farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9):141-146.
- [11] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):24-27.
LUO Chun-yan, TU Shi-hua, PANG Liang-yu, et al. Effect of rain intensity on nutrient losses from sloping land of purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):24-27.
- [12] 冯国禄,龚军慧.人工降雨对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):130-133.
FENG Guo-lu, GONG Jun-hui. Effects of artificial rainfall on dynamics of nitrogen and phosphorus in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):130-133.
- [13] 潘忠成,袁溪,李敏.降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):9-13.
PAN Zhong-cheng, YUAN Xi, LI Min. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):9-13.
- [14] 王明刚.粤北石漠化土地水土流失过程的人工降雨模拟试验研究[D]. 广州:华南师范大学, 2007.
WANG Ming-gang. Artificial rainfall simulation experiment on soil erosion process of rocky desertification land in northern Guangdong Province[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007.
- [15] 王辉,王全九,邵明安,等.表土结皮影响坡地产生沙及养分流失的试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4):35-38.

- WANG Hui, WANG Quan-jiu, SHAO Ming-an, et al. Impact of soil crust on runoff, sediment and nutrient loss from sloping land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4):35-38.
- [16] Kleinman P J A, Srinivasan M S, Dell C J, et al. Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4):1248-1259.
- [17] Bolan N S, Hedley M J, White R E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures[J]. *Plant and Soil*, 1991, 134(1):53-63.
- [18] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11):4576-4582.
- WU Xi-yuan, ZHANG Li-ping, ZHANG Miao-xian, et al. Research on characteristics of nitrogen loss in sloping land under different rainfall intensities[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2007, 27(11):4576-4582.
- [19] Ren Y B, Ren N Q, Li X K, et al. Efficiency of urban wetlands in removing agricultural non-point source pollution[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25(9):4726-4730.
- [20] 徐 晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1957-1962.
- XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12):1957-1962.
- [21] 周卫军, 王凯荣. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9):1017-1022.
- ZHOU Wei-jun, WANG Kai-rong. Effects of inorganic-organic fertilizer incorporation on productivity and soil fertility of rice cropping system in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1017-1022.
- [22] Dou Z, Knowlton K F, Kohn R A, et al. Phosphorus characteristics of dairy feces affected by diets[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6):2058-2065.
- [23] 张铁钢, 李占斌, 李 鹏, 等. 模拟降雨条件下不同种植方式的坡地氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):5-8.
- ZHANG Tie-gang, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Characteristics of nitrogen loss in sloping land under different rainfall patterns under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):5-8.
- [24] Gao Y, Zhang J Z, Zhu B, et al. Phosphorus transport with runoff of simulated rainfall from purple-soil cropland of different surface conditions[J]. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, 2008, 7(2):85-92.