

自然降雨条件下淮北平原农田氮素流失特征研究

杨继伟^{1,2}, 袁宏伟^{1,2}, 袁先江^{1,2}, 李如忠³, 曹秀清^{1,2}

(1.安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽蚌埠 233000;

2.水利水资源安徽省重点实验室, 安徽蚌埠 233000; 3.合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要 [目的]研究自然降雨过程中农田氮素径流流失特征。[方法]基于淮北平原区1次典型的自然降雨,分析降雨强度、径流量及排水中TN、PN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度变化。[结果]自然降雨条件下,降雨强度和径流量变化趋势基本一致,但产流时间较降雨时间以及径流量较降雨强度的变化均有一定滞后效应;随着径流量增大,排水中TN、PN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度快速增大,且达到峰值的时间较径流峰值时间提前,峰值过后三者质量浓度快速下降,降雨停止后随着径流减少TN趋于稳定,PN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 继续降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度与径流量呈反向变化特征;随着雨强和径流量的变化3种形态氮素比例动态变化,且降雨时颗粒态氮大于溶解态氮,降雨停止后PN和可溶态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 减少,可溶态 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 增加;相关性分析表明,降雨强度与径流量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、PN和TN呈正相关关系,与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈负相关关系;整个径流过程TN、PN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度均值分别为11.50、6.58、2.11和2.88 mg/L,均超出了地表水V类水的标准。[结论]自然降雨径流过程中农田排水给周围水体带来较大的环境风险,该研究为该地区氮素流失特征研究及面源污染控制提供理论基础。

关键词 自然降雨;径流;农田;氮素流失;面源污染

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)22-0065-04

Study on Nitrogen Loss Characteristics of Farmland in Huaibei Plain under Natural Rainfall Conditions

YANG Ji-wei^{1,2}, YUAN Hong-wei^{1,2}, YUAN Xian-jiang^{1,2} et al (1. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233000; 2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu, Anhui 233000)

Abstract [Objective] The research aimed to study the characteristics of nitrogen runoff loss in farmland during natural rainfall. [Method] Based on a typical natural rainfall process in Huaibei Plain area, the rainfall intensity, runoff and the mass concentration of TN, PN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in drainage was analyzed. [Result] Under the condition of natural rainfall, the trend of runoff was in accord with the trend of the rainfall intensity basically, but the change of runoff time and runoff had a certain lag effect compared with the change of rainfall intensity. With increase runoff, the mass concentration of TN, PN, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ increases rapidly, that the peak time of nitrogen mass concentration was earlier than the peak time of runoff, and after the peak three mass concentration reduced rapidly. As the runoff decreased TN tends to be stable, the PN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ continue to reduce when the rain stopped. However the change of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ reverse to the change of runoff. With the change of rainfall intensity and runoff, the percentage of nitrogen in the three morphologies changed dynamically, and the grainy nitrogen was larger than the dissolved nitrogen during the rainfall. Grain nitrogen and soluble $\text{NH}_4^+\text{-N}$ decreased and soluble $\text{NO}_3^-\text{-N}$ increased after rainfall stopped. Correlation analysis showed that rainfall intensity was positively correlated with runoff, TN, PN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and negatively correlated with $\text{NO}_3^-\text{-N}$. The average mass concentration of TN, PN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were 11.50, 6.58, 2.11 and 6.58 mg/L respectively, which go beyond the standard of the surface water V class. [Conclusion] In the course of natural rainfall runoff, agricultural drainage brings great environmental risks to surrounding water. This paper provides a theoretical basis for the study of nitrogen loss characteristics and regional non-point source pollution control.

Key words Natural rainfall; Runoff; Farmland; Nitrogen loss; Non-point source pollution

氮素是农作物生长所必需的大量元素^[1],同时也是引起水体富营养化的重要因子^[2-3]。土壤中氮素主要以铵态氮和硝态氮被作物吸收利用,因此为达到高产稳产的目的,数十年来农田化肥施用量逐步增加,且主要以可溶性的铵态氮肥和硝态氮肥为主^[4-5]。由于铵根离子带正电,容易被胶体吸附迁移能力较弱,而硝酸根带负电不易被吸附,迁移能力相对较强,易随地表径流或下渗造成流失,致使土壤中的氮素流失风险加大^[6-7]。农田作为氮素流失重要源头,其中一部分的氮素随着降雨径流和灌溉排水过程向周围水体迁移转化,多年来因农田氮素流失造成的非点源污染问题日益被重视^[3,8-9]。径流是降雨过程中重要的自然现象和水文过程,同时也成为土壤氮磷等溶质迁移转化的主要动力和重要的流失途径,研究降雨径流过程中土壤氮素迁移转化特征对农业面源污染防控有着重要意义。

目前,关于降雨径流与土壤氮素流失方面的研究很多,研究发现降雨强度、降雨量、作物类型、地面坡度以及施肥水平是影响农田氮素流失的主要因素^[10-13],但大多通过人工降雨形式模拟研究降雨径流条件下氮素形态迁移机理,或基于大流域尺度降雨后开展流域断面氮素污染负荷及变化特征研究^[14-15],然而基于自然降雨过程中农田氮素流失动态变化特征研究较少,尤其是针对淮北平原区关于该问题的研究鲜有报道。淮北平原区是我国重要的粮食主产区且以旱作物为主,汛期雨量约占全年降水量的70%左右,较易形成地表径流。因此有必要开展自然降雨过程中农田氮素流失动态特征研究,为该区域氮素流失风险评估和面源污染防治提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试基地概况 该研究地点为安徽省水利科学研究院新马桥农水综合试验站,位于安徽省蚌埠市城区北22 km处,地理坐标为117°21'E、33°09'N。该区域年降雨量平均约为910 mm,且70%的降雨量集中在汛期,年平均径流深240 mm。土壤类型属于淮北平原区典型的砂姜黑土,土壤胀缩性大,质地黏重,遇到强降雨易形成地表径流。试验站内

基金项目 国家青年科学基金项目(51409002);安徽省水利科技计划项目(slkj201603);安徽省水利科学研究院青年创新基金项目(sk201708)。

作者简介 杨继伟(1989—),男,安徽萧县人,工程师,硕士,从事农田灌溉理论与农田水土环境保护研究。

收稿日期 2018-06-04

分为农业种植试验区和生活绿化区,站区周围为农田。该试验研究区域为站内农业种植试验区,占地面积约 3.4 hm²,作物类型和种植管理模式与当地农耕方式基本相同,种植作物类型及布局见图 1。区内有完善的排水沟渠,沟渠垂直剖面呈倒梯形结构,沟口、沟底和深度分别为 0.7、0.4 和 0.6 m,排水沟坡降为 0.04%,降雨径流排水最终汇集至西南角出水口流入站区西侧公路排水沟。沟渠铺装材料为预制混凝土材料,沟渠内杂草和淤泥较少,排水过程中减小了排水阻力,水力停留时间短,对氮磷截留作用较弱,适宜开展农田氮磷等流失特征方面的研究。该试验研究区域四周有砖砌围墙,可以有效阻隔站内生活区以及外围农田的地表径流进入试验排水沟,使得研究区域形成一个相对独立的封闭环境,为该试验开展提供了有利的研究条件。

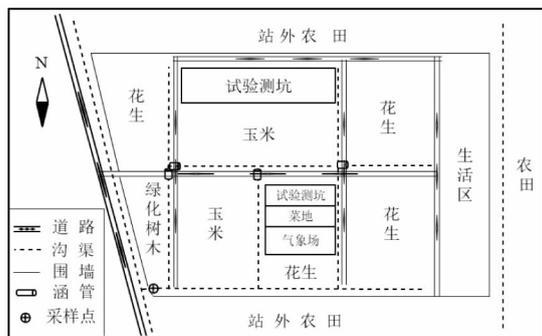


图1 研究区域概况

Fig.1 Overview of research area

1.2 试验方法与方案设计 试验时间选择在夏季作物种植后,降雨前采集几种作物类型表层(0~20 cm)土壤,测得其理化性质均值分别为全氮 1.01 g/kg、有机质 14.78 g/kg、碱解氮 64.52 mg/kg、有效磷 50.94 mg/kg、速效钾 48.52 mg/kg、土壤容重 1.4 g/cm³、田间持水量 28.0%。结合 2016 年 6 月 21 日的降雨过程,利用试验站自动气象站测量降雨量,由于沟渠比较规则,采用漂浮法测流量 Q,同时用采集降雨和出水口水样,时间间隔均为 1 h。所采水样分两部分完成测试,一部分不过滤测试其 pH 和总氮(TN),另一部分经 0.45 μm 的滤纸过滤测氨态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)。测试方法分别为:TN 采用过硫酸钾分光光度法,NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法,具体测试方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[16],采用 Smart chem 200 全自动化学分析仪等仪器完成测试。此外,颗粒态氮(PN)等于 TN 与 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的差值^[17]。

1.3 数据分析 采用 Excel 2007 数据处理软件对试验数据进行统计分析,运用 SPSS 22.0 处理软件中 Pearson 相关性分析方法对各参数之间相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 降雨量与径流量关系 从 6 月 21 日整个降雨过程中降雨强度及径流量(图 2)可以看出,此次降雨过程降雨强度和径流量均有明显的峰谷变化特征,属于典型的自然降雨过程。入渗和径流是降雨的 2 个重要水文过程,据此该次降雨过程大致可分为 2 个阶段。第 1 阶段为降雨入渗阶段,此次

降雨起始时间为 02:30,排水沟出水口开始有径流时间为 09:45,在此期间累计降雨量为 24.8 mm,平均降雨强度为 3.27 mm/h;该阶段降水被土壤吸收并通过下渗作用补充土壤水分和地下水位,此阶段土壤含水率逐渐增加^[11,18],使得径流时间较降雨时间滞后。第 2 阶段为径流阶段,产流后随着降雨强度逐渐增大,径流量快速增大,降雨量和流量峰值时间约为 13:00,经计算峰值降雨强度大小分别是峰值前 3 h 降雨强度的 8.11、1.59 和 1.52 倍,而峰值径流量分别是前 3 个时间点径流量的 6.84、1.61 和 1.37 倍;峰值过后随着降雨强度减弱径流量快速减小,经计算峰值降雨强度大小是其后 3 h 降雨强度的 2.09、73.00 和 18.25 倍,而径流峰值是其后 3 个时间点径流量的 1.25、1.19 和 5.11 倍;15:00—16:00 雨强较前 1 h 又出现了小幅增大,而径流量随之再次增大的时间延迟了近 1 h,降雨停止后径流量又持续降低。由此可见,径流量和降雨强度的变化趋势基本一致,但二者变化速度有所不同,径流量较降雨强度变化速度有一定滞后效应。

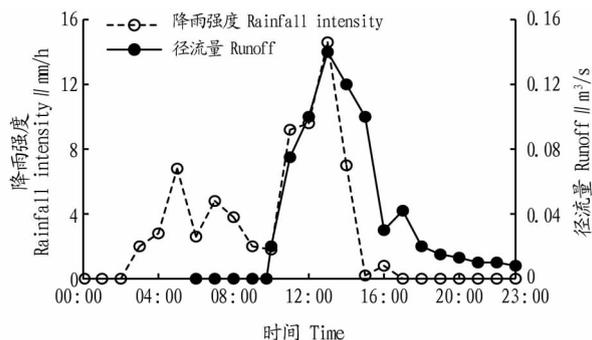


图2 降雨强度与径流量动态变化特征

Fig.2 Dynamic change characteristics of rainfall intensity and runoff

2.2 径流排水中氮素变化特征 降雨径流是氮素迁移的重要载体和动力^[6,11-14],鉴于降雨初期没有径流产生,因此这里仅对第 2 阶段有径流条件下排水中 TN、PN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 进行统计分析,结果见图 3。经计算,此次降雨过程中 TN、PN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均质量浓度分别为 11.50、6.58、2.11 和 2.88 mg/L,浓度远超出氮素水体富营养化临界值(0.20 mg/L)的水平,均超出了地表水 V 类水(2.00 mg/L)的标准^[19],TN 则超出地表水 V 类水标准的 5.7 倍,其峰值浓度甚至达到 22.33 mg/L,超过地表水 V 类水标准的 11 倍。表明此次降雨径流过程造成了农田土壤中氮素的流失,给周围水体带来较大的环境风险,因此淮北平原区农田氮素随降雨径流流失问题应该引起重视,并且应采取一定措施加以控制。

从图 3 可看出,自然降雨条件下 TN、PN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 均有明显的峰谷起伏变化特征,其中 TN、PN 和 NH₄⁺-N 的质量浓度随着径流量的增大而增大,三者达到浓度峰值时间较径流量峰值时间提前 2 h,浓度值分别为 22.33、16.23 和 4.41 mg/L,峰值过后浓度值快速下降;虽然受 16:00 雨强增大的影响三者质量浓度有所波动,但在降雨停止后 TN、PN 和 NH₄⁺-N 则缓慢下降。此外降雨停止后较降雨时径流中 TN、PN、NH₄⁺-N 明显减小,经计算三者质量浓度分别

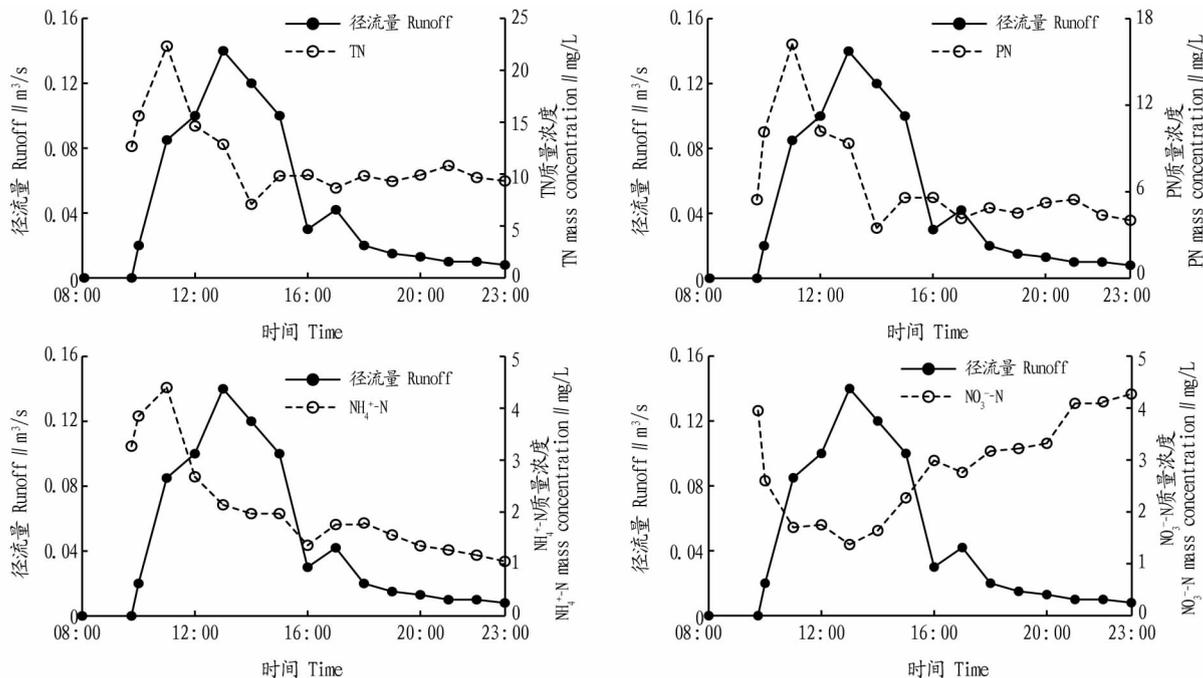


图3 氮素质量浓度随径流量的变化特征

Fig.3 Change characteristics of nitrogen mass concentration with runoff

减少 26.4%、43.5% 和 47.5%。而 NO_3^- -N 与 PN、 NH_4^+ -N 表现出不同的变化特征,随着径流量增大其质量浓度减小,反之其质量浓度增大。由此表明降雨强度和径流是导致氮素流失的主要因素,但不同形态氮素随降雨强度变化其迁移能力和流失特征有所差异。

几种形态氮素流失出现不同变化特征主要因其各自的化学特性不同,使得其在土壤中赋存形式有所差异,PN 主要以有机氮等在泥沙颗粒中富集, NH_4^+ -N 带正电容易被带负电的土壤颗粒吸附;而 NO_3^- -N 溶解性较强,主要赋存在土壤溶液中^[6-7]。随着降雨强度增大,雨水对土壤表面冲刷作用增强,泥沙等颗粒态物质迁移能力增强,因此降雨径流初期 PN 和 NH_4^+ -N 随着雨强增大而增大。但随着降雨历时延长,土壤表面的 NH_4^+ -N 因冲刷含量有所降低,加之雨强增大,雨水对溶质稀释作用不断增强,径流中 PN 和 NH_4^+ -N 较径流提前达到峰值后并快速降低。降雨停止后农田冲刷作用减弱,土壤表层出现结皮,PN 和 NH_4^+ -N 的迁移能力变弱,土壤表层氮含量进一步降低且深层土壤氮难以迁移至表层径流中,导致降雨停止后二者浓度值不断降低。由于径流初期土壤表层 NO_3^- -N 背景值相对较高,且淋溶能力强,径流初期浓度值较高,随着雨强增大稀释作用增强,径流流失的 NO_3^- -N 不断降低。降雨径流峰值过后径流量减小,土壤深层的硝态氮继续向径流液迁移补充,随着径流量减小其质量浓度呈增大趋势。因此,笔者认为在一定雨强和降雨历时范围内,径流液中 PN 和 NH_4^+ -N 的质量浓度随雨强增大而增大,溶解态 NO_3^- -N 质量浓度减小;反之随着降雨强度减弱,PN 和 NH_4^+ -N 流失质量浓度减少,溶解态 NO_3^- -N 质量浓度增大。

由于不同形态的氮素具有各自的化学和生态学特性,在

其进入水体后引起的环境和生态效应不同^[17, 20-22],因此有必要分析降雨径流过程中进入水体不同形态氮素占总氮比重的动态变化。该研究以 3 种形态氮素质量浓度与总氮质量浓度百分比形式表现,结果见图 4。从三者的数值变化看,降雨过程中 $\text{PN}/\text{TN} > \text{NH}_4^+ - \text{N} / \text{TN} > \text{NO}_3^- - \text{N} / \text{TN}$;降雨停止后 $\text{PN}/\text{TN} > \text{NO}_3^- - \text{N} / \text{TN} > \text{NH}_4^+ - \text{N} / \text{TN}$,最终 $\text{NO}_3^- - \text{N} / \text{TN}$ 的值超过了 PN/TN 的值。结果表明,自然降雨条件下,降雨过程中及降雨停止后径流排水中 3 种形态氮素所占总氮的比例是动态变化的,降雨过程中颗粒态氮素比例大于溶解态氮素,降雨停止后颗粒态氮和溶解态氮比例相当,且随着径流量增大颗粒态氮比例增大,溶解态氮比例减少,随着将流量减弱,颗粒态氮比例减少,可溶态 NH_4^+ -N 先增加后减少,而 NO_3^- -N 占比不断增大。

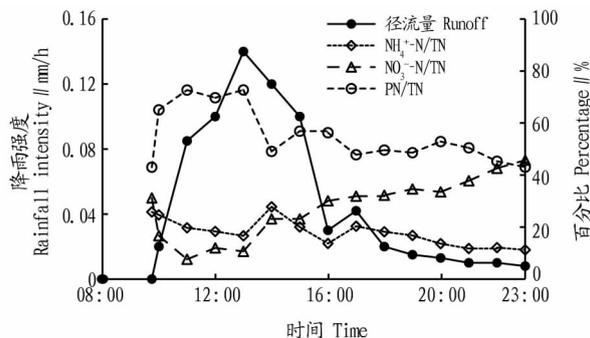


图4 3种形态氮素占总氮百分比随径流量的变化特征

Fig.4 Change characteristics of three forms nitrogen percentage in total nitrogen with runoff

2.3 降雨强度、径流量与氮素变化特征相关性分析 为进一步探究降雨强度、径流量、各种形态氮素及其与总氮比值之间的相互关系,运用 Pearson 相关分析方法对各参数之间的

相关性进行检测,样本数据来源“2.1”和“2.2”中分析数据,结果见表1。

表1 降雨强度、径流量与氮素相关性分析结果

Table 1 Results of correlation analysis of rainfall intensity, runoff and nitrogen in various forms

因素 Factor	降雨强度 Rainfall intensity	径流量 Runoff	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	PN	TN	NH ₄ ⁺ -N/TN	NO ₃ ⁻ -N/ TN	PN/TN
降雨强度 Rainfall intensity	1.000								
径流量 Runoff	0.818**	1.000							
NH ₄ ⁺ -N	0.532*	0.314	1.000						
NO ₃ ⁻ -N	-0.808**	-0.868**	-0.627*	1.000					
PN	0.636*	0.416	0.829**	-0.557*	1.000				
TN	0.522*	0.263	0.837**	-0.426	0.983**	1.000			
NH ₄ ⁺ -N/ TN	0.348	0.308	0.597*	-0.611*	0.099	0.072	1.000		
NO ₃ ⁻ -N / TN	-0.809**	-0.751**	-0.803**	0.925**	-0.803**	-0.705**	-0.495	1.000	
PN/ TN	0.762**	0.651**	0.667**	-0.724**	0.889**	0.798**	0.087	-0.899**	1.000

注:“***”表示在置信度(双测)为0.01时显著;“**”表示在置信度(双测)为0.05时显著

Note:“***” means significant when the confidence (double measure) is 0.01;“**” means significant when the confidence (double measure) is 0.05

从表1可以看出,降雨强度和径流量之间存在显著正相关($P < 0.01$),相关系数达到0.818,进一步表明降雨强度是影响径流量的主要因子。降雨强度与NH₄⁺-N、PN和TN呈显著的正相关性($P < 0.05$),而与NO₃⁻-N表现为负相关($P < 0.01$);降雨强度与NH₄⁺-N/TN和PN/TN也呈一定正相关,且与PN/TN的相关系数达0.762,而与NO₃⁻-N/TN呈负相关,同时径流量与氮素之间的相关性和降雨强度与相应指标的相关性基本一致。表明降雨强度是影响径流的主要因子,且对氮素的流失特征产生重要影响。此外氮素形态之间存在一定的相关性,TN与NH₄⁺-N、PN表现为显著正相关($P < 0.01$),意味着降雨过程中TN质量浓度变化主要受NH₄⁺-N和PN质量浓度变化的影响。

3 结论

(1)自然降雨条件下,径流量和降雨强度变化趋势基本一致,但产流时间较降雨时间以及径流量的变化较降雨强度变化均有一定滞后效应。

(2)自然降雨过程该区域农田土壤中的氮素易随排水流失,此次降雨过程中几种形态氮素质量浓度均值都超出了地表水V类水的标准,给周围水体带来较大的环境风险。

(3)自然降雨条件下,随着降雨强度的变化,几种形态氮素有明显的峰谷变化特征:随着降雨强度增大,TN、PN和NH₄⁺-N的质量浓度增大,三者质量浓度达到峰值的时间较径流峰值时间提前;峰值过后至降雨停止前,三者质量浓度快速降低;降雨停止后TN、PN和NH₄⁺-N缓慢降低;而NO₃⁻-N质量浓度随着径流量增大其质量浓度减小,反之其质量浓度呈增大趋势。

(4)自然降雨条件下,排水中氮素形态构成比例动态变化,随着径流量增大颗粒态氮比例增大,溶解态氮比例减少;随着径流量减弱,颗粒态氮比例减少,可溶态NH₄⁺-N先增加后减少,而NO₃⁻-N占比不断增大。

(5)降雨强度与流量呈正相关关系($P < 0.01$),与NH₄⁺-N、PN和TN呈正相关关系($P < 0.05$),与NO₃⁻-N呈负相关

关系($P < 0.01$)。

参考文献

- [1] 杨泽峰,刘培玉,李录久.配方施肥对小麦生长发育和经济效益的影响[J].安徽农业科学,2017,45(21):19-20,88.
- [2] LEHTINEN S, TAMMINEN T, PTACNIK R, et al. Phytoplankton species richness, evenness, and production in relation to nutrient availability and imbalance[J]. Limnology and oceanography, 2017, 62(4): 1393-1408.
- [3] 胡倩倩,梁越,丁新航,等.鄱阳湖边缘湖区水体营养状态分析:以大湖池和沙湖为例[J].安徽农业科学,2018,46(9):70-74.
- [4] 刘钦普.中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J].农业工程学报,2017,33(6):214-221.
- [5] 李子涵.我国粮食生产中的化肥过量施用研究[J].安徽农业科学,2016,44(16):245-247.
- [6] 潘志成,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.
- [7] 汪庆兵,曹旖旎,张建锋,等.浙江赋石水库集水区板栗林土壤氮素迁移特征[J].应用生态学报,2017,28(2):545-553.
- [8] 杜军,杨培岭,李云开,等.不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):66-74.
- [9] 孙铖,周华真,陈磊,等.农田化肥磷地表径流污染风险评估[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1266-1273.
- [10] 郭燕虹,张丽萍,邓龙洲,等.坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):27-33.
- [11] 薛鹏程,庞燕,项颂,等.模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1362-1368.
- [12] 何佳吉,余钟波,杨传国,等.降雨强度对小流域土壤溶质流失的影响评估[J].安徽农业科学,2012,40(12):7328-7330.
- [13] 焦平金,许迪,王少丽,等.施肥与作物类型对旱作农田氮磷径流流失的影响[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(5):614-617.
- [14] 张林,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J].环境科学,2018,39(2):792-799.
- [15] 章熙锋,申东,唐家良,等.紫色土农业小流域径流过程与氮流失尺度效应[J].水土保持研究,2018,25(2):72-80.
- [16] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 薛金凤,夏军,梁涛,等.颗粒态氮磷负荷模型研究[J].水科学进展,2005,16(3):334-337.
- [18] 甘永德,贾仰文,刘欢,等.膨胀性土壤降雨入渗产流模型[J].水利学报,2017,48(10):1220-1228,1239.
- [19] 中国环境科学研究院.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [20] 杜乔乔,孙甲岚,周潮晖.引滦调水期河道水中氮素形态特征分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(5):82-86.
- [21] 罗雅莹,杨志新.短程硝化-反硝化过程中氮素形态变化研究[J].云南农业大学学报,2012,27(3):408-412.
- [22] 常会庆,李娜,徐晓峰.三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究[J].生态环境,2008,17(2):511-514.