

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.038.

张小磊, 裴颖春, 夏长会, 等. 黄河下游典型潮土区玉米地径流氮素流失特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 113-121.

ZHANG Xiaolei, PEI Yingchun, XIA Zhanghui, et al. Characteristics of Nitrogen Loss from Corn Field Surface Runoff in Typical Fluvo-aquic Soil Area of the Lower Reaches of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 113-121.

黄河下游典型潮土区玉米地径流氮素流失特征

张小磊¹, 裴颖春¹, 夏长会², 聂山权³, 王业宁¹, 李春发¹

(1.河南省科学院地理研究所, 郑州 450052;

2.河南财政金融学院, 郑州 450046; 3.河南融科实业有限公司, 郑州 450008)

摘要: [目的]揭示自然降雨过程中黄河下游潮土区农田氮素随地表径流的流失特征,为地表径流水质预测及农业面源污染防控提供参考。[方法]采用定位试验的方法,在黄河下游典型潮土区进行夏季不同降雨条件下玉米地径流水质的连续监测,并分析了径流中 TN(总氮)、DN(溶解态氮)、NN(硝态氮)和 AN(铵态氮)的浓度变化过程、流失水平与强度及其影响因素。[结果](1) 不同形态氮素浓度的峰值均出现在径流过程的前期,之后随降雨的持续,浓度曲线整体上呈下降的变化趋势;(2) 径流中 TN, DN, NN 的 EMC(次降雨事件污染物平均浓度)均超过或接近地表水 V 类水质标准(2.00 mg/L),其中 TN 的 EMC 随降雨强度的增大依次是 V 类水质标准的 1.75, 1.72, 1.91, 2.01 倍,表明研究区域已存在明显的氮素污染风险;(3) 径流中 TN 的流失以 DN 为主,而 NN 又以 DN 为流失主体,二者的 EMC 贡献率分别为 56.75%~80.99%和 72.78%~81.39%,并且在中、小降雨条件下贡献率更大;(4) TN, DN, NN, AN 的流失强度和流失率均随降雨强度的增大而增大,各形态氮素流失强度和流失率的平均值分别为 366.06, 227.38, 170.17, 35.47 g/hm²和 39.55, 24.30, 18.07, 7.46 g/(h·hm²);(5) Pearson 相关分析结果显示:径流量和 TSS(悬浮物)对 AN 浓度的影响较小,但对 TN, DN, NN 浓度的影响却十分明显;其中,中、小降雨条件下 TN, DN, NN 浓度与径流量之间均存在显著的正相关关系($p < 0.05$),且在小雨条件下相关性更为显著($p < 0.01$);大、暴雨条件下, TN 浓度受到径流量和 TSS 的双重影响($p < 0.05$),且降雨强度越大,影响越强烈,但二者对 DN, NN 浓度的影响却并未达到显著水平。[结论]黄河下游潮土区夏季玉米地径流中各形态氮素的流失特征存在明显差异,可根据降雨强度的大小采取适宜的氮素流失防控策略,且控制径流并减少水土流失对提高氮素流失防治效率具有十分重要的意义。

关键词: 氮素流失; 面源污染; 潮土区; 径流; 黄河下游

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0113-09

Characteristics of Nitrogen Loss from Corn Field Surface Runoff in Typical Fluvo-aquic Soil Area of the Lower Reaches of the Yellow River

ZHANG Xiaolei¹, PEI Yingchun¹, XIA Zhanghui², NIE Shanquan³, WANG Yening¹, LI Chunfa¹

(1. Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan Institute of Finance, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Rongke Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450008, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the characteristics of nitrogen loss from corn field surface runoff in the fluvo-aquic soil area of the lower reaches of the Yellow River during the natural rainfall, and to provide reference for predicting surface runoff quality and preventing agricultural non-point source pollution. [Methods] Based on the method of positioning test, the continuous monitoring of dryland surface runoff quality under different rainfall conditions in summer was carried out. The concentration change process, loss level, intensity and influencing factors of TN (total nitrogen), DN (dissolved nitrogen), NN

收稿日期: 2022-06-24

修回日期: 2022-08-15

资助项目: 河南省科技发展规划项目(202102310599, 222400410344); 河南省高等学校重点科研计划项目(21B910001); 河南省科学院人才队伍建设专项(200401003); 河南省科学院科研开发专项(220601029)

第一作者: 张小磊(1981—), 男, 河南漯河人, 博士, 副研究员, 主要从事资源利用与环境保护研究。E-mail: skyxlzhang@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

(nitrate nitrogen) and AN (ammonium nitrogen) in runoff were analyzed. [Results] The peak values of different forms of nitrogen concentration appeared in the early stage of runoff process, and then the concentration curve showed a downward trend with the continuation of rainfall. The EMC (event mean concentration) of TN, DN and NN in runoff exceeded or approached the class V water quality standard of China's surface water (2.00 mg/L). With the increase of rainfall intensity, the EMC of TN were 1.75, 1.72, 1.91 and 2.01 times higher than that of the class V water quality standard, respectively, indicating that there was an obvious risk of non-point source nitrogen pollution in the study area. The loss of TN in runoff was mainly DN, and NN was the main loss of DN. Their EMC contribution rates were 56.75%~80.99% and 72.78%~81.39%, respectively, but the rates were seemed greater under the medium and small rainfall conditions. The loss intensities and loss rates of TN, DN, NN, AN both increased with the increase of rainfall intensity, and their average values of every rainfall were 366.06, 227.38, 170.17, 35.47 g/hm² and 39.55, 24.30, 18.07, 7.46 g/(h·hm²), respectively. Pearson correlation analysis showed that runoff and TSS (suspended solids) had little effect on the concentration of AN, but had a very obvious effect on the concentrations of TN, DN and NN, and there was a significant positive correlation between TN, DN, NN concentrations and runoff under the medium and small rainfall conditions ($p < 0.05$), and it seemed that the correlation was more significant under the smaller rainfall condition ($p < 0.01$). Pearson correlation analysis also showed that the concentration of TN was both affected by runoff and TSS ($p < 0.05$) under the condition of heavy rain and rainstorm, and the greater of the rainfall intensity was, the more stronger of their impact, but the impact on DN and NN concentration didn't reach the significant level. [Conclusion] There were significant differences in the characteristics of nitrogen losses of various forms in summer maize field runoff in the fluvo-aquic soil area of the lower reaches of the Yellow River. Appropriate nitrogen loss prevention and control strategies could be adopted based on the magnitude of rainfall intensity, and controlling runoff and reducing soil erosion could be of great significance to improving the efficiency of nitrogen loss prevention and control.

Keywords: nitrogen loss; non-point source pollution; fluvo-aquic soil area; runoff; lower reaches of the Yellow River

氮素是组成地球生命系统的关键因素,对维系全球农业生产能力具有重要意义^[1]。然而,随着人类活动的加剧,越来越多的氮素被释放进河流、湖泊以及地下水中,引起水体富营养化等诸多生态和环境问题^[2]。因而,氮素流失成为人们关注的一个焦点问题,并得到了广泛的研究^[3]。美国国家环境保护局^[4]通过对农业面源污染的调查后认为,受损河流水体中氮素等污染物的近50%是由农田径流进入的;我国生态环境部^[5]对全国污染源普查后发现,面源水污染中氮素污染物的46.52%来自于农业源;程红光等^[6]对黄河流域面源污染负荷的估算与分析结果表明,农田是黄河流域重要的面源氮素污染来源,贡献率达到50%以上并与汛期密切相关。由此可见,农田是水体氮素污染物的主要来源之一,而降雨、径流又是影响农田氮素流失的重要因素。因此,相关领域学者对不同地形^[7-8]、土地利用方式^[9-10]、植被类型^[11-12]、管理模式^[13-14]以及气象水文等^[15-16]条件下农田氮素随径流流失情况进行了较为深入的分析与

探讨,这对水污染防控、面源污染治理以及区域生态环境改善均具有重要意义。

黄河下游沿岸地区交通便利,潮土遍布,且土层深厚,耕作历史悠久^[17],是我国重要的生态屏障和农业经济地带,在我国生态安全和农村经济社会发展方面具有十分重要的地位。近年来,在保障粮食生产安全的前提下,沿岸地区不断加大农业开发利用规模,提升氮肥使用强度,导致过度施肥现象严重,极易引发氮素的农业面源污染问题^[18],加之该地区人口稠密、村镇分布相对集中,大量生活废弃物的排放使得这一问题有进一步加剧的趋势^[19]。为此,亟需开展黄河下游沿岸地区氮素流失相关问题的研究,这有利于推动该地区农业面源污染监测、风险防控及治理工作的开展。然而,现阶段此类研究在该地区还显得十分薄弱。以往的研究发现^[20-21],年周期中面源营养元素的流失多集中在汛期的几场降水过程。鉴于此,本文以黄河下游典型潮土区玉米地为研究对象,依据实际监测数据,分析夏季不同降雨条件下地表径流过程

中氮素的流失特征及其影响因素,以期为黄河下游沿岸地区生态环境保护和农业面源污染防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地(115°8'E,36°6'N)位于黄河下游沿岸地区的濮阳市南乐县李庄村。该地属暖温带半湿润大陆型季风气候,四季分明,冷暖适中,光照充足;年平均气

温 13.8℃,年平均日照时数 2 526 h,无霜期 205 d,年平均降雨量 599.7 mm,降雨年际变化较大,年内分配不匀,多集中于夏季;土壤类型为潮土,表层土壤(0—20 cm)基本理化性质见表 1。试验地所在区域周围无工业污染源,且地势平坦,农业基础设施条件良好,是黄河下游典型的粮食综合生产强区;习惯种植模式为“小麦(*Triticum aestivum* L.)—玉米(*Zea mays* L.)”轮作,间有花生(*Arachis hypogaea* L.)、大豆(*Glycine max* L. Merr.)等种植。

表 1 研究区表层土壤基本理化性质

pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤颗粒组成/%		
						砂粒	粉粒	黏粒
8.4	14.63	1.12	0.79	21.98	1.27	26.25	59.49	14.26

1.2 试验设计

遵循代表性和合理性的原则,参照全国农田面源污染监测点标准,在典型地块建立田间试验小区(地表坡度<0.5°),设置 3 个重复。每个小区四周均用水泥墙隔离,封闭形成微水文循环系统,其中 3 侧水泥墙高出地面 10 cm,以避免侧渗和串流;出水侧与地表齐平,并建有导水槽和径流池(顶部设有遮雨设施,导水槽两端高中间低,出水口处设置自动流量监测器),用于接收、监测地表径流及土壤侵蚀状况(图 1)。

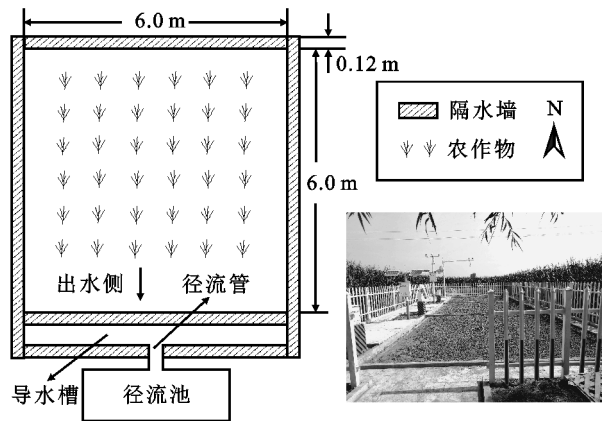


图 1 试验小区平面示意

试验小区按照当地耕作习惯种植。当期种植作物为玉米,品种为乐农—87,种植密度为 66 000 粒/hm²,播种时间为 2020 年 6 月 2 日;土壤基础肥力情况如表 1 所示,其中碱解氮 78.27 mg/kg,硝态氮 16.08 mg/kg,铵态氮 3.61 mg/kg。所有小区实行统一田间管理,氮肥(尿素,N 46%)、磷肥(磷酸二铵复合肥,P₂O₅ 46%,N 18%)、钾肥(氯化钾,K₂O 60%)均为一次性基施,施入量分别为 N 220 kg/hm²,P₂O₅ 85 kg/hm²,K₂O 85 kg/hm²。

1.3 样品采集与测定

试验于 2020 年 6—8 月进行,共记录降雨事件(rainfall event, RE)19 次,其中 9 次监测到完整的径

流过程;依降雨量的大小,选取降雨过程前 72 h 内无其他有效降水的降雨事件用于本研究,共筛选得到 4 期监测数据(表 2)。采样时,在地表产流初期每 10 min 采集 1 次,连续采集 3 次;之后每 30 min 采集 1 次。所有样品均置于净化后的 500 ml 聚乙烯采样瓶中,迅速带回实验室,取上层清液冷藏于 4℃冰柜内,并于 48 h 内完成各试验指标测试;其余样品抽去清液后烘干(120℃),称重,计算悬浮物(TSS)含量。

分析测定指标包括总氮(TN)、溶解态氮(DN)、硝态氮(NN)和铵态氮(AN),其中 TN 取原样品清液摇匀后直接测定,DN,NN 和 AN 则将水样过 0.45 μm 滤膜后测定。测定方法^[22]:TN,DN 采用硫酸钾氧化—紫外分光光度法,NN 采用紫外分光光度法,AN 采用靛酚蓝试剂比色法。室内测定采取规范操作,并对供试样品进行平行样测定,各平行样的平行性均在 10%以内。

表 2 不同降雨监测数据

降雨事件	日期/月-日	降雨量/mm	降雨时长/h	平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)
RE1	06-25	9.3	6.8	1.37
RE2	06-16	19.1	12.5	1.53
RE3	07-11	37.5	9.6	3.91
RE4	08-12	56.6	8.4	6.74

1.4 数据处理

采用次降雨事件污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)表示次降雨过程中径流的污染物平均流失水平^[23],其计算公式如下:

$$EMC=M/V=\sum_{i=1}^nC_iQ_i/\sum_{i=1}^nQ_i$$

式中:EMC 为次降雨事件污染物平均浓度(mg/L);M 是次降雨过程中污染物总质量(g);V 是次降雨径流总体积(m³);C_i 为 i 时刻的瞬时污染物质量浓度

(mg/L); Q_i 为*i*时刻的径流量(L/min); n 为次降雨过程中收集水样数。

利用次降雨过程中污染物总质量与径流积水区面积的比值表示次降雨事件单位面积污染物流失强度,即:

$$P=M/S=\sum_{i=1}^n C'_i Q_i \Delta T/S$$

式中: P 为次降雨过程中污染物流失强度(g/hm²); S 为径流积水区面积(hm²); C'_i 为*i*时刻的瞬时污染物质量浓度(g/L); ΔT 为采集间隔(min)。

采用Excel 2007,SPSS 22.0和Origin 2018软件进行数据的处理与统计分析,并用单因素方差

分析和独立样本*t*检验方法处理数据组间的差异性,用Pearson相关分析方法处理数据组间的相关性。本文显著性差异水平: $p<0.05$ 为差异显著, $p<0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 降雨及径流特征

以24 h降雨量计,本研究降雨事件可分为小雨(RE1月、6月25日)、中雨(RE2月、6月16日)、大雨(RE3月、7月11日)和暴雨(RE4月、8月12日)4个类型(表2)。各次降雨和径流过程如图2所示。

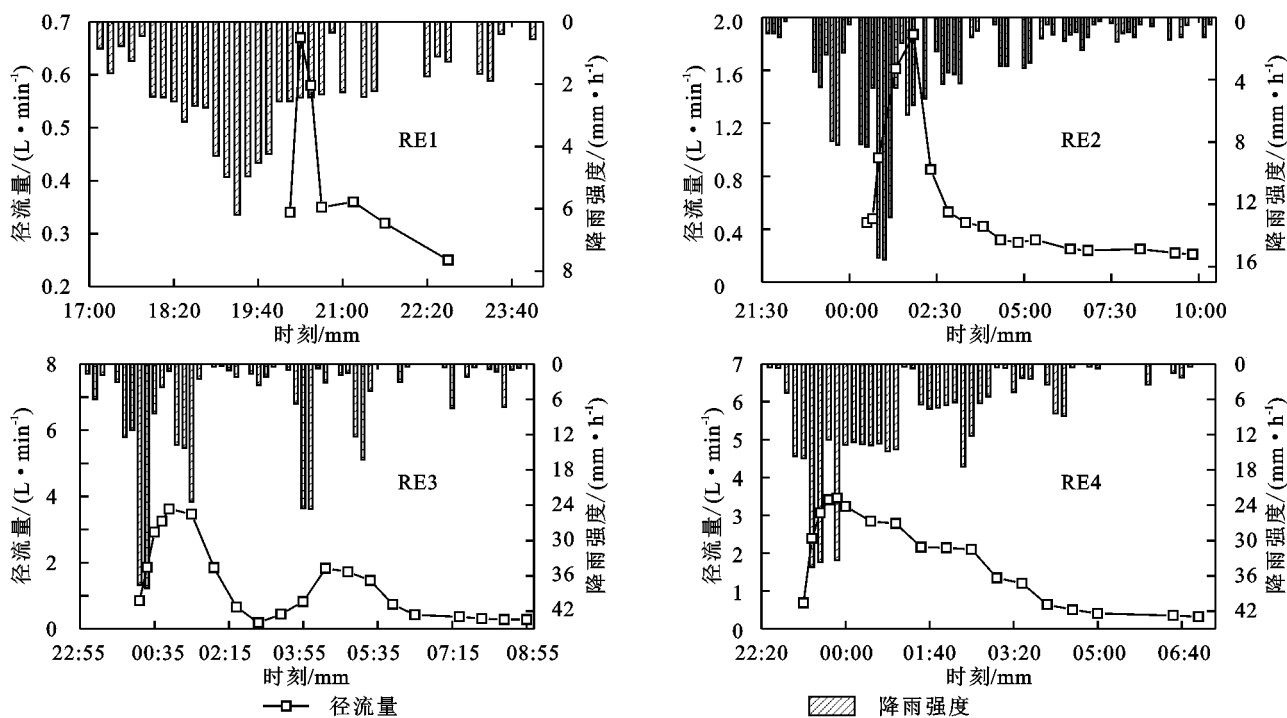


图2 不同降雨和径流过程

由图2和表2可知,试验小区4次降雨总体上均具有暖温带半湿润大陆型季风气候区常见降雨的特点。具体而言,RE1降雨相对平缓,降雨量较小,降雨强度的平均值和峰值均较低,分别仅为1.37,6.20 mm/h;RE2降雨量明显升高,但降雨强度变化较大,与RE1相比,尽管其最大值达到RE1的2.51倍,然而由于降雨历时较长,RE2平均降雨强度仍然较低,仅为RE1的1.12倍;RE3降雨量进一步升高,平均降雨强度为3.91 mm/h,且降雨过程变化剧烈,最大降雨强度达到38.06 mm/h,是RE1的6.14倍;RE4暴雨条件下,降雨强度的平均值和峰值均较高,分别为6.74,33.65 mm/h,且降雨过程总体上呈减小的变化特征,其中前期表现出阶段性稳定的特点,中后期则表现出间歇波动的特点,但波峰相对较低。

观察图2可以看出,径流过程与降雨过程的变化

趋势在RE2中基本一致,但在其他3次降雨事件中却均体现出了较大差异。其中,RE1产流缓慢,但产流后径流量迅速达到峰值0.67 L/min,之后总体上呈减小的变化趋势;RE3中,得益于大雨的强力驱动作用,产流明显加快,径流量也显著增大,峰值突出,达到RE1的5.40倍,且径流曲线整体上呈现出“双峰”形态;RE4中,降雨的驱动作用进一步显现,产流更为迅速,径流量激增,在达到峰值3.46 L/min后逐渐呈减小的变化趋势。值得注意的是,RE4中后期降雨的间歇波动并未明显改变径流曲线的变化趋势,这可能是由于RE4前期土壤中蓄积的大量水分在中后期得以逐渐释放,使得径流过程相对连续,并且RE4的中后期降雨小波峰持续时间较短,导致降雨量的增加并未对径流量的变化产生显著的影响。

分析各次降雨和径流过程还可以得出,RE1,

RE2, RE3 和 RE4 中径流量峰值出现的时间均明显滞后于最大强度降雨时刻, 滞后时间依次表现为: $RE1 > RE2 > RE3 > RE4$, 这与产流响应时间的长短顺序相一致, 从而表明降雨后地表径流产流及峰值的响应时间与降雨强度密切相关, 并且降雨强度越大, 响应时间越短。

2.2 径流中氮素浓度变化

图3为不同径流中氮素浓度变化情况。由图3可知, 中、低强度降雨(RE1, RE2)条件下, 径流中TN, DN, NN浓度的变化趋势均较为相似, 并与径流过程(图2)之间存在一定的响应关系, 表现为在径流产生时, TN, DN, NN浓度初值均较大, 之后随着径流量的增加略有升高, 当浓度达到峰值后即快速降低并逐渐趋于稳定; 与TN, DN, NN不同, AN的浓度值相对较小, 在径流前期呈微弱增加趋势, 之后便无明显变化。就高强度降雨(RE3, RE4)而言, 径流中DN和NN浓度的变化趋势基本一致, 表现为在径流

产生时浓度值最大, 之后随径流的持续逐渐减小, 再于波动中趋于稳定, 对比图2可以看出, DN, NN浓度的变化与径流过程之间并无明显的响应关系, 这在径流前期尤其如此; 与DN, NN明显不同, RE3, RE4降雨事件中TN在径流产生后的前30 min内波动明显, 之后呈显著升高趋势, 当达到峰值后又大幅降低, 降幅分别为57.88%和32.72%; 随着降雨的持续, 在中后期TN整体上分别与两次径流过程相对应, 均呈下降的变化趋势, 但TN对径流中后期峰值的响应并不强烈; AN的浓度值在RE3, RE4中依然较小, 且整个降雨过程中其变化均不明显。

进一步分析图3可知, 尽管夏季不同降雨条件下各形态氮素流失浓度的波动幅度存在明显差异, 但TN, DN, NN在径流前期的浓度均明显高于中后期, 表现出较为一致的变化特征。这一结果可能由潮土区玉米地表氮素的富集特征及不同降雨条件下雨水对氮素驱动力的强弱差异共同作用所致。

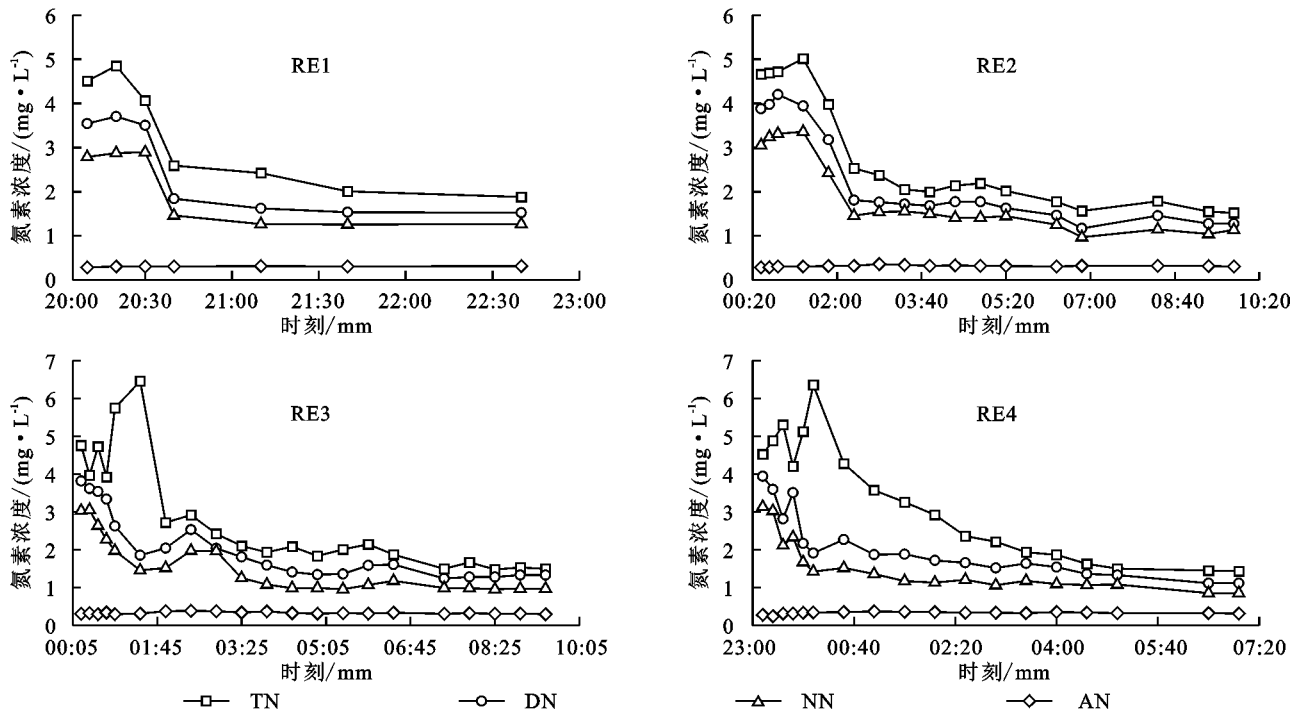


图3 不同径流中氮素浓度的变化

2.3 径流中氮素流失水平

表3为不同降雨条件下玉米地径流中氮素污染物的平均流失水平。4次降雨事件中各形态氮素平均流失水平(EMC)的变化情况并不一致。对TN而言, 在中、小降雨条件下EMC相对较低, 且差异不明显($p > 0.05$); 但随着降雨强度的增大, EMC显著升高($p < 0.05$), 这表明随着降雨强度的增大, 土壤中的TN将面临更大的流失风险。就DN和NN而言, 二者EMC随降雨强度的改变具有一致的变化特征, 均

表现为在RE2中最高, 这可能是因为在本研究中, RE2为夏季的首次有效降雨, 且持续时间长, 在降雨的作用下地表富集的NN等溶解态氮素得以释放并随径流大量流失; 首次有效降雨之后, 其他3次降雨中EMC随降雨强度的增大而减小, 即: $RE1 > RE3 > RE4$, 这表明降雨量的增加对玉米地径流中DN和NN起到了明显的稀释作用。就AN而言, 尽管EMC也随降雨强度的不同而有所差异, 但差异程度很小($p > 0.05$), 说明径流中铵态氮的流失并没有受

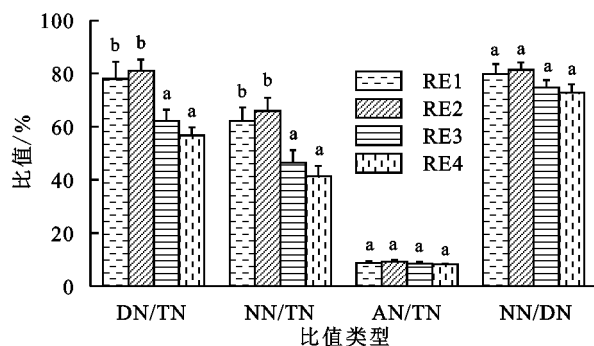
到降雨强度变化的明显影响,从而异于其他形态氮素的流失。

表3 不同降雨条件下氮素平均流失水平

降雨事件	mg/L			
	TN	DN	NN	AN
RE1	3.50±0.21a	2.73±0.14b	2.17±0.11b	0.31±0.017a
RE2	3.44±0.20a	2.78±0.13b	2.27±0.09b	0.32±0.016a
RE3	3.83±0.21b	2.38±0.11a	1.78±0.10a	0.32±0.021a
RE4	4.02±0.17c	2.28±0.08a	1.66±0.07a	0.33±0.015a

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

图4显示,4次降雨中DN与TN的EMC比值介于56.75%~80.99%,平均值为69.48%;在溶解态氮中,NN与DN的EMC比值介于72.78%~81.39%,平均值为77.17%;由此可知,夏季黄河下游潮土区玉米地径流中氮素的流失以溶解态氮为主,而硝态氮又是溶解态氮的主要组成部分,这可能是因为硝态氮带有负电荷,较难被土壤吸附,且易溶于水,因而拥有较强的迁移能力。图4还表明,与RE1,RE2相比,RE3,RE4中DN与TN以及NN与DN的EMC比值均明显偏低($p<0.05$),这与陈玲等^[16]的研究结果相近,说明大、暴雨条件下,DN对TN以及NN对DN的贡献率均在减小,可能是由于大、暴雨条件下雨滴对土壤的作用力在增大,因而更多的泥沙细粒与可溶性物质被冲刷进径流水体,并伴有“超渗产流”现象^[24],导致颗粒态以及其他可溶态氮素浓度的增加,从而降低了DN对TN以及NN对DN的贡献。



注:同组不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

图4 不同形态氮素 EMC 的比值

2.4 径流中氮素流失强度

表4为不同降雨条件下玉米地径流氮素流失强度。由表3和表4可知,不同降雨中玉米地径流氮素流失强度的变化特征与EMC明显不同。本研究中,TN, DN, NN和AN的流失强度在RE1中均为最低;但随着降雨强度的增大,各氮素的流失强度迅速增大,并在RE4中达到最大,分别占总流失强度的43.88%,41.26%,39.28%和44.18%;就平均值而言,

TN, DN, NN和AN的次降雨平均流失强度分别为366.06, 227.38, 170.17, 35.47 g/hm², 稍高于陈玲等^[16]对黄棕壤坡耕地的研究结果。考虑降雨时长的影响,本研究用次降雨污染物平均流失率表征降雨对玉米地径流氮素流失效率的影响。分析表2和表4可知,径流中的氮素平均流失率也随降雨强度的增大而增大(表5),其中TN, DN, NN流失率的最大值分别达到76.50, 44.67, 31.83 g/(h·hm²),次降雨平均值分别为39.55, 24.30, 18.07 g/(h·hm²), DN对TN以及NN对DN流失率的比值分别介于58.08%~79.79%, 71.24%~81.85%。由上述分析可见,高强度降雨是引起潮土区玉米地径流氮素流失的关键,应合理安排农事,并避免在此降雨条件下施肥尤其是易溶性化肥的表施劳作。

表4 不同降雨条件下氮素流失强度 g/hm²

降雨事件	TN	DN	NN	AN
RE1	38.88±2.38a	29.82±1.59a	23.86±1.29a	4.05±0.22a
RE2	229.33±17.89b	182.98±10.16b	149.77±6.56b	22.47±1.46b
RE3	553.45±35.42c	321.46±19.92c	239.70±14.74c	52.68±3.63c
RE4	642.58±29.57d	375.26±16.61d	267.34±12.55c	62.69±2.85c

表5 不同降雨条件下氮素平均流失率

降雨事件	g/(h·hm ²)			
	TN	DN	NN	AN
RE1	5.72	4.39	3.51	0.60
RE2	18.35	14.64	11.98	1.80
RE3	57.65	33.49	24.97	5.49
RE4	76.50	44.67	31.83	7.46

2.5 径流因子对氮素流失的影响

Pearson相关分析表明,本研究中降雨强度、径流量、TSS均能对玉米地表径流中氮素的流失产生明显影响,但其影响又因氮素形态的不同而有所差异(表6)。具体而言,RE1, RE2降雨强度下, TN, DN, NN的流失浓度与径流量以及TSS之间均存在正相关关系,但仅与前者相关性达到显著水平($p<0.05$),且在RE1降雨中相关性更为显著($p<0.01$),从而表明中低强度降雨条件下,径流量的大小是影响潮土区玉米地TN, DN, NN径流流失的主导因素,且降雨强度越小,影响越显著;RE3, RE4降雨强度下, TN, DN, NN浓度与径流量和TSS之间也均存在正相关关系,其中TN与径流量间的相关性达到极显著水平($p<0.01$), TN与TSS间的相关性也在显著水平以上($p<0.05$),由此可以认为,在大、暴雨条件下潮土区地表TN的流失受到径流量和TSS的双重影响,并且降雨强度越大,影响越显著。因而,在进行农

业生产活动时,应采取适当的水土保持措施,管控氮素输出,以降低高强度降雨下氮素污染风险。4 次降雨中 AN 与影响因子间的相关性均较弱,这表明氮素流失过程中 AN 较少受到外部环境变化的影响,其原因可能跟氮素流失过程中 AN 与土壤胶体间的较强引力有关。

表 6 径流中氮素浓度与水沙因素的 Pearson 相关系数					
降雨事件	影响因子	TN	DN	NN	AN
RE1	径流量	0.766 **	0.762 **	0.760 **	-0.076
	TSS	0.285	0.298	0.319	0.105
RE2	径流量	0.674 *	0.621 *	0.616 *	-0.126
	TSS	0.533	0.480	0.492	0.239
RE3	径流量	0.803 **	0.489	0.411	-0.196
	TSS	0.667 *	0.495	0.429	0.131
RE4	径流量	0.811 **	0.448	0.354	0.114
	TSS	0.849 **	0.424	0.368	0.139

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著, ** 表示在 0.01 水平上相关性显著。

3 讨论

降雨是导致地表产流的关键驱动因素^[25-26],而径流则是养分流失的重要溶剂和载体^[16,27]。本研究中,在不同降雨条件下潮土区玉米地径流的产流及峰值滞后时间具有较大差异,且与降雨强度之间均存在

一定的负相关关系(图 2),体现出一致的变化规律。这与包鑫等^[28]在潮河流域的研究结果较为相似,其原因可能与地表雨水的汇集速率有关。通常而言,相近的土壤环境条件下,降雨强度越大,雨水汇集速率越快,从而导致径流产流与峰值滞后时间越短。然而与径流峰值相比,不同径流中氮素浓度峰值的滞后效应并没有一致的变化特征(表 7)。在本研究中,TN 和 DN 浓度峰值在 RE1 中与径流峰值出现时间保持一致,TN 在 RE2 中以及 DN 和 NN 在除 RE1 外降雨中的浓度峰值分别早于径流峰值时间 30~60 min,其他情况下各形态氮素浓度峰值均滞后于对应径流峰值时间,并以 AN 的滞后效应最为明显。这除了与降雨强度有关外,还可能与径流过程中不同形态氮素的来源有关,并由此导致氮素浓度峰值的响应时间不尽相同^[29],因此应加强对不同形态氮素来源的进一步研究。一些研究表明^[30],径流中氮素污染物浓度的峰值多出现在径流过程的前期,之后随降雨的持续,浓度曲线呈下降的变化趋势。本研究结果也印证了这一观点(图 3),分析原因可能是在自然降雨条件下,雨水的驱动作用使氮素在径流前期发生了富集效应,之后随着降雨的持续,雨水的稀释作用愈加显现,加之土壤表层氮素含量因雨水的冲刷相对减少^[31],这就导致径流中氮素浓度整体上呈下降趋势,体现出了较为明显的稀释效应。

表 7 不同降雨条件下径流中氮素浓度峰值滞后时间									
降雨事件	t_1	TN		DN		NN		AN	
		t_2	$\Delta t/\text{min}$	t_2	$\Delta t/\text{min}$	t_2	$\Delta t/\text{min}$	t_2	$\Delta t/\text{min}$
RE1	20:20	20:20	0	20:20	0	20:30	10	21:10	50
RE2	01:50	01:20	-30	00:50	-60	01:20	-30	02:50	60
RE3	00:55	01:25	30	00:15	-40	00:25	-30	02:25	90
RE4	23:50	00:00	10	23:10	-40	23:10	-40	01:00	70

注: t_1 为径流峰值时刻; t_2 为径流中氮素浓度峰值时刻; Δt 为时间间隔,负值表示氮素峰值早于径流峰值。

就流失形态而言,夏季降雨条件下黄河下游玉米地氮素主要以溶解态流失,而硝态氮又是溶解态氮流失的主体,这与罗义峰等^[32]对三峡库区以及宋娅丽等^[16]对滇中地区氮素流失的相关研究结论一致。但本研究中 DN 对 TN 以及 NN 对 DN 的次降雨平均贡献率分别达到 69.48% 和 77.17%,与宋娅丽等^[16]的研究结果相比略高,可能是因为与其他研究中的用地及耕作方式不同,本研究所在区域位于国家粮食生产主产区,长期的高强度耕作使土壤表层扰动强烈,且化肥使用量较大,使地表存有更多的可溶性养分物质,在降雨的冲刷作用下,这些可溶性养分物质能够大量进入径流水体,导致 DN 对 TN 以及 NN 对 DN

的贡献相对较大。通常情况下,降雨产流中污染物流失浓度越高,周围环境面临的面源污染风险越大。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[33],本研究 RE1,RE2,RE3 和 RE4 中 TN, DN, NN 的 EMC 均超过或接近地表水 V 类水质标准(2.00 mg/L),其中 TN 的 EMC 分别是 V 类水质标准的 1.75, 1.72, 1.91, 2.01 倍,但《2020 年河南省生态环境状况公报》却显示^[34],本研究所在区域基流断面水质总体在 III 类以上,这表明该区域已经普遍存在着较为严重的氮素污染风险。进一步对氮素流失强度进行分析后发现,降雨强度越大,氮素的流失负荷越高(表 5),也表明高强度降雨条件下,氮素流失问题将愈加严重,应当引起相关

部门的高度重视。

已有的研究结果揭示^[35],土壤中的氮素能够通过降雨的侵蚀、溶解和稀释作用离开原来的位置随径流流失于地表水体^[26],而这种侵蚀、溶解和稀释作用的强弱又受到降雨强度、径流量、TSS等水沙因素变化的共同影响,并由此造成径流中氮素流失的差异。宋林旭等^[36]对三峡库区香溪河流域氮素流失特征研究后认为,径流中氮素的流失与降雨强度、径流量、TSS之间呈显著的正相关关系;薛鹏程等^[31]对模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征分析后也得出相似的研究结论;本研究分析结果则进一步显示,不同降雨条件下它们之间的相关性因氮素形态的不同而有所差异(表6)。因此,下一步应针对氮素的不同形态开展更为深入的流失规律研究。需要注意的是,中、小降雨条件下尽管本研究中TSS与TN, DN, NN间的相关性并未达到显著水平($p > 0.05$),但相关系数却随降雨强度的增大而增大(表6),这在一定程度上表明低强度降雨条件下,随着降雨量的加大,因水土流失而致的氮素输出问题不容忽视;而大、暴雨条件下尽管径流量和TSS对TN的影响十分显著,但对DN, NN的影响却相对较弱,这表明在大、暴雨条件下可能有更多其他形态的氮素加入到TN的流失过程,并且这部分氮素可能与径流量及TSS均密切相关,在今后的研究中应加强对这类氮素流失的关注。

4 结论

(1) 不同降雨条件下,黄河下游潮土区夏季玉米地径流中氮素的流失特征存在明显差异;就输出过程而言, TN, DN, NN和AN浓度的峰值均出现在径流过程的前期,之后随降雨的持续,浓度曲线整体上均呈下降的变化趋势;就输出水平而言, TN, DN, NN的EMC均超过或接近国家地表水Ⅴ类水质标准。

(2) 径流中氮素主要以DN形态流失,而NN又是DN流失的主体;与高强度降雨相比,玉米地低强度降雨条件下DN对TN以及NN对DN的贡献率均更大,因此可根据降雨强度的大小采取适宜的氮素流失防控策略。

(3) TN, DN, NN, AN的次降雨流失强度和流失率均随降雨强度的增大而增大,其中,暴雨条件下地表氮素流失尤为严重,流失强度分别占到各氮素总流失强度的43.88%, 41.26%, 39.28%和44.18%。

(4) 夏季降雨过程中,径流量和TSS对AN浓度的影响较小,但对TN, DN, NN浓度的影响却十分

明显;其中,中、小降雨条件下,径流量的大小是影响TN, DN, NN浓度的关键因素,且降雨强度越小,影响越显著;大、暴雨条件下,尽管DN, NN浓度与径流量和TSS间的相关性并未达到显著水平,但TN浓度却显著受到径流量和TSS的双重影响,且降雨强度越大,影响越强烈。因此,控制径流并减少水土流失对提高玉米种植区地表氮素流失防治效率具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 庞树江, 王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 213-223.
- [2] Ouyang W, Skidmore A K, Toxopeus A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 373-380.
- [3] 姜和震, 吴习锦, 郝芳华, 等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1535-1549.
- [4] US Environmental Protection Agency. National management measures to control nonpoint source pollution from agriculture[M]. Washington: Createspace, 2015.
- [5] 生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- [6] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 384-391.
- [7] Fang H. Effect of soil conservation measures and slope on runoff, soil, TN, and TP losses from cultivated lands in northern China[J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107677.
- [8] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩. 紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 43-48.
- [9] Janeau J L, Gillard L C, Grellier S, et al. Soil erosion, dissolved organic carbon and nutrient losses under different land use systems in a small catchment in northern Vietnam[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 314-323.
- [10] Wu L, Long T Y, Liu X, et al. Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the Three Gorges reservoir area, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(3): 1405-1422.
- [11] Yao J J, Cheng J H, Zhou Z D, et al. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in northern China[J]. Catena,

- 2018,167:411-421.
- [12] 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.
- [13] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,663: 971-979.
- [14] 吴小雨,李天阳,何丙辉.长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征[J].环境科学,2021,42(6):2810-2816.
- [15] Deng L, Sun T, Fei K, et al. Coupling loss characteristics of N-P-C through runoff and sediment in the hilly region of SE China under simulated rainfall[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 37204-37216.
- [16] 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.
- [17] 王国强.河南自然条件与资源[M].北京:商务印书馆,2016.
- [18] 彭舜磊,李鹏,王梓臣,等.河南省农业面源污染负荷估算及区划[J].水土保持研究,2018,25(1):225-230.
- [19] 陶园,徐静,任贺靖,等.黄河流域农业面源污染时空变化及因素分析[J].农业工程学报,2021,37(4):257-264.
- [20] Nangia V, Gowda P H, Mulla D J. Effects of changes in N-fertilizer management on water quality trends at the watershed scale[J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97(11):1855-1860.
- [21] 刘梅冰,陈兴伟,陈莹.流域非点源氮素流失空间分异特征的多时间尺度分析[J].应用生态学报,2015,26(7):2183-2191.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [23] Ostrom T K, Davis A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall[J]. *Water Research*, 2019, 166:115071.
- [24] 宋娅丽,王克勤,董莉,等.滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征[J].水土保持学报,2010,24(4):7-11.
- [25] 李佳韵,童菊秀,夏传安,等.降雨条件下农田氮素地表径流流失特征研究[J].灌溉排水学报,2016,35(7):8-15.
- [26] 连慧姝,刘宏斌,李旭东,等.典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应:以太湖乌溪港为例[J].环境科学,2017,38(12):5047-5055.
- [27] Pan C, Shangguan Z. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2006,331(1/2):178-185.
- [28] 包鑫,江燕,胡羽聪.潮河流域降雨径流事件污染物输出特征[J].环境科学,2021,42(7):3316-3327.
- [29] Du X Z, Li X Y, Hao S N, et al. Contrasting patterns of nutrient dynamics during different storm events in a semi-arid catchment of northern China[J]. *Water Science and Technology*, 2014,69(12):2533-2540.
- [30] 井光花,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J].农业工程学报,2012,28(6):120-125.
- [31] 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.
- [32] 罗义峰,陈方鑫,周豪,等.次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响[J].环境科学,2021,42(5):2260-2267.
- [33] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准[S]. GB 3838-2002.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [34] 河南省生态环境厅.2020年河南省生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthjt.henan.gov.cn/2021/06-04/2158630.html>, 2021-06-04/2021-10-24.
- [35] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水—沙—氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.
- [36] 宋林旭,刘德富,过寒超,等.三峡库区香溪河流域不同源类氮、磷流失特征研究[J].土壤通报,2013,44(2):465-471.