

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出

袁远,杨海洋,王江彦,申冲,杨国馨,吴明作

引用本文:

袁远,杨海洋,王江彦,等.人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出[J].农业环境科学学报,2022,41(1):123-131.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0576

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江下游"玉米-花菜"轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 沈根祥, 张敏, 付侃, 王振旗, 赵庆节 农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2167-2178 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0323

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 侯朋福, 徐德福, 杨林章 农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761-2769 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397

岔口小流域非点源污染模型AnnAGNPS不确定性分析

娄永才,郭青霞 农业环境科学学报.2018,37(5):956-964 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1272

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

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧,赵春发,王青青,徐蕴韵,郭加汛,王腊春 农业环境科学学报.2021,40(1):174-184 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

袁远,杨海洋,王江彦,等.人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出[J].农业环境科学学报,2022,41(1):123-131. YUAN Y, YANG H Y, WANG J Y, et al. Simulated rainfall effect on non-point source nitrogen output from fluvo aquic soil in the Huaihe River watershed, Henan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 123-131.



人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出

袁远,杨海洋,王江彦,申冲,杨国馨,吴明作*

(河南农业大学林学院,郑州 450002)

摘 要:为研究淮河流域农田非点源输出、区域农业非点源污染控制与管理,以河南淮河流域典型土壤(潮土)及其是否秸秆还田为对象,人工模拟0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm·min⁻¹降雨强度下的径流、泥沙和氮输出负荷。结果表明:降雨强度越大,相同时间段内的累积径流量、累积泥沙量、氮输出量以及三者的产出速率均越大;径流中氮元素的浓度在降雨初期的20 min内变化较大,具初期冲刷效应,随后波动并趋于相对稳定或略有降低,其平均浓度在未掺混秸秆时以2.0 mm·min⁻¹降雨强度时最大,其次为3.0 mm·min⁻¹,掺混秸秆后以1.5 mm·min⁻¹时最大;未掺混秸秆时氮元素泥沙输出量占总输出量的98.25%以上,但掺混秸秆后输出量有所降低(最低值为65.12%)。秸秆还田后,分别可在<1.0 mm·min⁻¹与<1.5 mm·min⁻¹的低降雨强度下减少径流与泥沙流失量,高降雨强度下则增加泥沙流失量;径流氮元素浓度比未掺混秸秆的高,增加了氮元素的累积输出量。累积径流量与累积泥沙量间及两者分别与氮元素输出量之间均存在良好的幂函数与对数函数关系,相关系数均在0.900以上。研究表明,降雨强度、秸秆还田均对径流、泥沙、氮输出等产生影响,引起氮输出明显变化的降雨强度在未掺混秸秆时为1.0 mm·min⁻¹,在掺混秸秆时为1.5 mm·min⁻¹;减少农田非点源氮输出负荷的重要途径包括控制产流初期氮流失与泥沙流失。

关键词:农业非点源;氮输出;人工降雨;秸秆还田;淮河流域

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)01-0123-09 doi:10.11654/jaes.2021-0576

Simulated rainfall effect on non-point source nitrogen output from fluvo aquic soil in the Huaihe River watershed, Henan Province, China

YUAN Yuan, YANG Haiyang, WANG Jiangyan, SHEN Chong, YANG Guoxin, WU Mingzuo*

(School of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To identify the effect of rainfall intensity and straw returning on nitrogen output, to provide a basis for quantifing and controlling farmland non point source nitrogen output in the Huaihe River watershed, and regional environment management, taking typical soil (fluvo aquic) with and without mixed straw in the Huaihe River watershed of Henan Province as study object, rainfall intensities of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm \cdot min⁻¹, and 3.0 mm \cdot min⁻¹ were simulated to study surface runoff, sediment loss, and nitrogen loss. Cumulative runoff, sediment loss, nitrogen output, and the loss rate of each over a fixed interval increased with rainfall intensity. The nitrogen concentration in runoff changed rapidly during the first 20 minutes of rainfall, showing an early flush effect, then fluctuated, becoming relatively stable or slightly declining at the end. Its average concentration without admixed straw increased from a high concentration at a flow rate of 3.0 mm \cdot min⁻¹. Nitrogen concentration was highest at a rainfall rate of 1.5 mm \cdot min⁻¹ in soil admixed with straw. The amount of nitrogen loss through sediment accounted for more than 98.25% of total loss, but was significantly reduced by mixing with straw (lowest loss rate was 65.12%). With straw returning, surface runoff and sediment loss could be reduced under low rainfall intensity (<1.0 mm \cdot

收稿日期:2021-05-18 录用日期:2021-08-06

作者简介:袁远(1975—),女,河南郑州人,博士,讲师,主要研究方向为环境污染治理。E-mail;yuanylc@henau.edu.cn

^{*}通信作者:吴明作 E-mail:wumingzuo@henau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800405-04)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800405-04)

 \min^{-1} and <1.5 mm $\cdot \min^{-1}$ respectively), but sediment loss could be increased under high rainfall intensity. Nitrogen concentration with admixed straw was higher than that without, increasing cumulative nitrogen output. There were good correlations between cumulative runoff and sediment and nitrogen output. All correlation coefficients were above 0.900. Rainfall intensity and straw returning affected surface runoff, sediment, and nitrogen output. Rainfall intensity induced an obvious change in nitrogen output, with maxima at 1.0 mm $\cdot \min^{-1}$ without admixed straw, and 1.5 mm $\cdot \min^{-1}$ with admixed straw. Two important means for controlling farmland non-point source load include controlling nitrogen and sediment loss at early rainfall stages.

Keywords: farmland non-point source; nitrogen output; artificial rainfall; straw returning; Huaihe River watershed

农业非点源输出是非点源污染负荷的主要来 源[1-2],占水体总污染负荷的比例较高[3],是水环境治 理与流域总量控制的关键环节。农业非点源污染 负荷主要来源于化肥农药过量施用、还田秸秆等降 解、养殖废水、污水灌溉等,其影响因素主要包括土 壤特性、径流过程、人工管理措施等四。增加土壤大 颗粒含量、改善土壤质地、提高入渗速率,可以减少 非点源输出量5%。氮流失浓度在降雨产流初期较高, 具明显的初期冲刷效应[6-7],而后随径流过程而降低 或较稳定[8-10];其输出量随降雨强度增大而增大,与 降雨量呈较好的幂指数相关。人工管理措施影响主 要包括施肥、耕作制度、秸秆还田等,其中化肥施用 是流域氮素流失的最主要影响因子^[11],施肥后未降 雨或不立即灌溉可降低输出负荷[12];作物覆盖能有 效减少颗粒态氮流失[13],秸秆覆盖度与径流量、土壤 流失量呈负相关[14]。非点源输出负荷可用输出系数 模型、实证模型和机理模型等进行测算,但仍需要针 对不同影响因素建立区域性较完整的基础数据库, 使模型本地化,尤其是农业非点源输出较严重的平 原区域[2,4,15]。人工降雨模拟具有可控性与可重复 性,因此可提供许多有益的基础数据¹¹⁰,国内外利用 该方法模拟了不同的土地利用方式[17-18]、土壤类 型[6,18]、植被覆盖[14]、施肥[12]、降雨强度[7,9-10]等条件下 的氮流失过程,但平原地区的人工降雨试验开展较 少[2,19],对于黄淮海平原秸秆还田条件下主要土壤类 型的非点源污染的模拟研究也少有报道[2,14]。淮河 流域耕地面积1266.67万 hm²,所在区域为国家粮食 生产核心区,化肥施用等农业生产活动导致农业非 点源污染较严重。本文以淮河流域的主要土壤类型 (潮土)为对象,通过人工降雨模拟不同降雨强度,研 究氮流失规律以及秸秆还田对氮流失的影响,以期 为制定区域非点源污染防治策略、改善农业管理措 施、提高流域水环境质量、建立本地化非点源污染模 型等提供基础数据,为该流域非点源污染的控制和 管理等提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省境内淮河流域面积8.83万km²,占全省总 面积的52.3%,涉及郑州、开封等11个市,流域内人口 5628.59万人,其中农业人口4638.83万人;总耕地面 积409.73万hm²。流域内多年平均降水量790mm,年 内降水多集中于5—8月,降水量年际变化大,丰、枯 年降水量比值大于2。

1.2 试验设计

人工降雨装置采用2 mm的钢板制作,保持5°倾斜,高度1.6 m,土槽尺寸为70 cm×40 cm×20 cm,装置上方设有孔径均匀的布水器,降雨高度为1.05 m^[10],径流出口尺寸为30 cm×3 cm×3 cm,径流出口处接径流收集容器;采用转子流量计控制降雨强度,根据已有研究^[6-7.9-10,19],降雨强度设计为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm·min⁻¹。

试验开始,利用转子流量计设定最小降雨强度, 填装土壤,填装完毕后启动人工降雨装置,记录径流 出现时间,径流出现后开始计时,每隔10min收集一 次径流水样,100min后停止人工降雨;将土壤挖出放 置,自然风干,待下一个降雨强度使用。径流水样收 集后测定水量,静置、过滤后测定泥沙含量,取上清液 与泥沙样测定氮含量。依次测定潮土在6种设定降 雨强度下的径流量与总氮含量。

1.3 试验材料

河南境内淮河流域的主要土壤类型包括褐土、潮 土、砂浆黑土、黄褐土和黄棕壤土^[20],试验土壤选取分 布面积较大且土地利用方式为农田的潮土。河南省 主要种植作物为小麦,小麦种植时基肥主要施复合 肥、尿素和小麦专用肥,用量约750 kg·hm⁻²,3月份浇 水追肥,主要为尿素,用量150~225 kg·hm⁻²。实际生 产中收获小麦的同时部分地块实施秸秆粉碎还田,秸 秆粉碎后长度为1~2 cm,可直接收集用于试验;根据 实地测量,秸秆还田厚度平均为2 cm。

2022年1月 袁远,等:人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出

试验用潮土取自开封市杞县(34°30'N,114°53' E,年降水量722 mm),直接采集小麦种植区域内未实 施秸秆还田地块的0~20 cm耕层土壤,采集时间为5 月上旬(此时未施追肥、未灌溉),土壤不过筛,直接打 碎填装;根据土壤容重和土槽容积计算需要填装的土 壤量。填装土壤时,每填充2.5 cm压实一次,在填充 上层土料前,抓毛下层土壤表面,以防土层间出现分 层现象。秸秆掺混试验采用小麦秸秆(小麦收割时收 集),根据土槽面积与还田厚度计算需要的秸秆量 (0.30 kg),将秸秆与土壤均匀掺混以模拟实际秸秆还 田状况。

试验用潮土容重 1.37 g·cm⁻³(环刀法),初渗率 0.67 mm·min⁻¹,渗透系数 1.30 mm·min⁻¹(双环刀法), 饱和持水量 27.83 mm,总氮质量分数 0.16 g·kg⁻¹。秸 秆中总氮质量分数为 9.30 g·kg⁻¹,纤维素与木质素含 量分别为 34.41%、25.88%。

1.4 分析方法

泥沙中总氮的测定方法为半微量开氏法(NY/T 53—1987);径流水样中总氮的测定方法为碱性过硫 酸钾消解-紫外分光光度法(HJ 636—2012)。

1.5 数据处理

根据径流量、泥沙流失量与氮浓度,再根据填装 土壤量计算每吨土壤流失的氮量。

径流(泥沙)氮流失量(mg)=径流(泥沙)中氮含 量(mg·L,mg·g⁻¹)×径流(泥沙)流失量(L,g)

每吨土壤氮流失量(g·t⁻¹)=[径流氮流失量(g)+ 泥沙氮流失量(g)]/填装土壤量(t)

填装土壤量(kg)=土壤容重(g·cm³)×土槽容积

 (dm^3)

采用 Excel 2013 软件进行数据的简单分析与 图形绘制,采用 SPSS 19.0进行相关性与回归分析、 显著性检验与两两比较(Duncan 与 LSD, One-way Anova)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度下潮土的径流产出与泥沙流失过程 2.1.1 径流产出过程

不同降雨强度下潮土的径流产生过程见图1。降 雨开始后20min内,径流产出增加较快,随后强度在 2.0mm・min⁻¹以下时增加较慢并趋于平缓,强度≥2.5 mm・min⁻¹时先增加后下降并有所波动。单位时间内 累积径流产出速率表现为先增加后平缓的趋势(图 2)。降雨强度越大,单位时间内产出径流及累积径流 量越多,累积径流产出速率也越大。Duncan检验表 明,径流量及其产出速率在不同降雨强度间的差异显 著(P<0.05),但0.5mm・min⁻¹与1.0mm・min⁻¹之间的 差异不显著。

不同降雨强度下潮土掺混秸秆与否处理的径流 产生过程见图3。无论是否掺混秸秆,径流产生过程 基本一致,均为初期增加较快,后期较平缓;降雨强度 为1.0 mm·min⁻¹与2.5 mm·min⁻¹时,掺混秸秆的径流 产出量均小于同期未掺混秸秆,其累积径流量也较 小;降雨强度为1.5 mm·min⁻¹时,掺混秸秆处理在开 始阶段径流产出量较高,直到后期才与未掺混秸秆处 理较接近,其累积径流量也比较接近。以上表明秸秆 还田在较低降雨强度下因具有良好的下渗与吸收等



不同小写字母代表不同降雨强度处理间差异显著(P<0.05)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among different intensities (P<0.05). The same below

图1 不同降雨强度下潮土的径流产生过程

Figure 1 Surface flow process of fluvo aquic soil under different rainfall intensities

www.ger.org.cn

126 IL



图2 不同降雨强度下潮土累积径流产出速率

Figure 2 Accumulated surface flows per minite of fluvo aquic soil under different rainfall intensities





Different lowercase letters in the figure stands for significant difference at different intensities with mixed straw (P<0.05), different uppercase letters stands for significant difference between mixed and not mixed straw under the same intensity (P<0.05). The same below

图3 掺混秸秆对不同降雨强度下潮土径流产生的影响

Figure 3 Surface flow process of fluvo aquic soil mixed straw under different rainfall intensities 作用而可以减少地表径流,降雨强度增大,其下渗与 吸收可能不及时,导致减少地表径流的作用并不明 显,较高降雨强度下,掺混秸秆可能会减少雨滴溅蚀、 减缓径流流速而使更多降水下渗,因此相比未掺混秸 秆时径流产出较少。

Duncan检验表明,掺混秸秆后,不同降雨强度间的径流量差异均极显著(P<0.01);相同降雨强度下, 掺混秸秆与未掺混秸秆潮土径流量的差异不显著。 累积径流量在各降雨强度下差异均不显著(Pmin= 0.525)。表明秸秆还田具有一定的减少地表径流的 作用,但作用有限。

以上结果显示,降雨强度在1.0 mm・min⁻¹以下、 1.5~2.0 mm・min⁻¹、2.5 mm・min⁻¹以上时分别显著影响 了径流产出。降雨强度影响存在一种类似于"跃迁"式 现象,可分为3个明显影响径流产出的时间区间,分别 是≤1.0 mm・min⁻¹、1.5~2.0 mm・min⁻¹和≥2.5 mm・min⁻¹。 2.1.2 泥沙流失过程

不同降雨强度下潮土随径流流失泥沙的过程见 图 4。在降雨最初的 20 min 内,流失泥沙量增加较



图4 不同降雨强度下潮土的泥沙产生过程



快,随后,降雨强度在0.5 mm·min⁻¹时较为平缓且很小,降雨强度达到1.0 mm·min⁻¹时即有明显差异,在 1.5~2.0 mm·min⁻¹时,各降雨强度引起的泥沙流失差 异不明显;且在2.5 mm·min⁻¹以上时,波动较大。降 雨强度增大,泥沙产生量最初增加较快,随后出现波 动并最终下降。不同降雨强度下的累积泥沙量、单位 时间累积泥沙流失速率分别与累积径流及其产出速 率的过程一致,基本呈直线上升或开始增加后平缓的 过程。Duncan检验表明,泥沙流失量在不同降雨强 度下差异极显著(P<0.01),但1.5、2.0 mm·min⁻¹与2.5 mm·min⁻¹之间的差异不显著。

土壤掺混秸秆后随径流流失泥沙的过程与未掺 混秸秆时的基本一致(图5)。降雨强度在1.5 mm· min⁻¹以下时,掺混秸秆土壤的泥沙流失量均小于未 掺混秸秆;累积泥沙流失量亦呈同样结果。泥沙是降 雨产生径流过程中流失的,因此径流产出与泥沙流失





Figure 5 Sediment loss process of fluvo aquic soil mixed straw under different rainfall intensities 过程基本一致,且秸秆的影响也基本相同,但对泥沙 流失的控制作用较大。

Duncan 检验表明,掺混秸秆后潮土在不同降雨 强度间的泥沙流失量具有极显著差异(Pmax=0.006), 但在1.0 mm·min⁻¹与1.5 mm·min⁻¹之间的差异不显 著。相同降雨强度下,掺混秸秆与未掺混秸秆的泥沙 流失量除在2.5 mm·min⁻¹时的差异不显著外,其他降 雨强度下差异均极显著(P<0.01),但累积泥沙流失量 差异均不显著。

结合降雨强度对径流与泥沙影响的结果可认为, 未掺混秸秆土壤,当降雨强度达到1.0 mm·min⁻¹时可 引起径流和泥沙的明显变化;掺混秸秆后引起明显变 化的降雨强度为1.5 mm·min⁻¹。降雨强度可能存在 "跃迁"式的影响。

通过 SPSS 分析,多数情况下径流量与泥沙流失量间难以建立可通过检验的回归模型;但无论是否掺 混秸秆,各种降雨强度下的累积径流量与累积泥沙流 失量间均可用幂函数来描述(P<0.01),最小相关系数 r=0.986(未掺混秸秆,降雨强度0.5 mm·min⁻¹)。

2.2 径流与泥沙中氮的输出特征

2.2.1 径流中氮浓度变化

随径流流失的氮浓度在不同降雨强度下均存在 波动(图6)。降雨强度为0.5 mm·min⁻¹时氮浓度波动 较大,1.0 mm·min⁻¹与1.5 mm·min⁻¹在最初20 min内 氮浓度下降较快,随后除在40~50 min增加较大外, 其余时段很平缓。氮流失浓度并不完全随降雨强度 增加而增大,6种降雨强度中,平均氮浓度均以2.0 mm·min⁻¹时最大,其次为3.0 mm·min⁻¹,平均浓度最 小的降雨强度为2.5 mm·min⁻¹。降雨强度较小时未 充分溶解氮素,降雨强度较大时氮素来不及溶解,而





Figure 6 Nitrogen concentration of fluvo aquic soil under different rainfall intensities

在中等降雨强度下氮素可充分溶解并随径流输出。 Duncan 检验表明,在1.0、1.5 mm·min⁻¹与2.5 mm· min⁻¹处理间流失氮浓度无显著差异,其他处理间差 异极显著(P<0.01)。

掺混秸秆后,土壤流失的氮浓度在最初20 min内 下降较快,随后出现波动,最终均有所上升;土壤随径 流流失的氮浓度表现为1.5 mm·min⁻¹>1.0 mm·min⁻¹> 2.5 mm·min⁻¹(图7)。掺混秸秆后,因秸秆粉碎产生 的微小碎末易被挟带而进入径流,这些微小碎末可能 因粉碎破坏而导致其中含量较丰富的氮素容易溶解 出来,从而使径流中的氮浓度比未掺混秸秆时高很 多,且出现最大浓度时的降雨强度也较小。

Duncan检验表明,掺混秸秆后,土壤流失的氮浓 度在1.0 mm·min⁻¹与1.5 mm·min⁻¹降雨强度之间差异 不显著,但二者均与2.5 mm·min⁻¹处理间差异极显著 (P<0.01)。土壤掺混秸秆与未掺混秸秆流失的氮浓 度除2.5 mm·min⁻¹时有极显著差异外(P<0.01),其余 降雨强度下均无显著差异。

2.2.2 径流中氮输出量的变化

由图 8 可知, 土壤氮流失量存在一定波动性, 在 初期 20 min 时有较大增加, 但随后基本表现为先下 降, 最终趋于稳定或略有降低的趋势。土壤累积氮流 失量均表现为随时间的延长而稳定增加。

Duncan检验表明,3.0 mm·min⁻¹与其他降雨强度 间的氮流失量的差异显著(P<0.05),2.5 mm·min⁻¹以 下的各降雨强度间没有显著差异。表明当降雨强度 达到3.0 mm·min⁻¹时可引起氮流失量的显著变化。

掺混秸秆后,土壤氮流失过程与未掺混秸秆时基 本一致(图9)。在1.5 mm·min⁻¹以下降雨强度时,掺 混秸秆土壤的氮流失量小于未掺混秸秆的,表明秸秆 还田具有减少径流与泥沙流失的作用,从而减少氮输 出量;当降雨强度增大时,掺混秸秆的流失量大于未 掺混秸秆,是因为一些秸秆微小碎末中的氮元素可能 更容易被溶解冲刷出来,同时,这些碎末也可能容易











Figure 9 Total losed nitrogen of fluvo aquic soil mixed straw under different rainfall intensities



图 8 不同降雨强度下潮土的氮流失量

Figure 8 Total losed nitrogen of fluvo aquic soil under different rainfall intensities

中文核川期刊

进入流失的泥沙中,在氮元素消解测定时释放其中的 氮,导致其流失量较大。累积氮流失量与此一致。

Duncan检验表明,掺混秸秆后,不同降雨强度间的氮流失量差异显著;但此差异主要体现在2.5 mm·min⁻¹与其他降雨强度间,1.0 mm·min⁻¹与1.5 mm·min⁻¹之间没有显著差异。相同降雨强度下,掺混与未掺混秸秆潮土的氮流失量差异均不显著。

SPSS相关性分析表明,无论是否掺混秸秆,各种降雨强度下径流量与试验土壤氮累积绝对流失量(径流流失、泥沙流失、总流失)、每吨土壤氮累积流失量(径流流失、泥沙流失、总流失)之间的相关性均可用幂函数来描述,其显著性水平P<0.004,最小相关系数r=0.908。泥沙量与上述各指标的相关性可用对数、幂与指数函数来描述,但多为对数函数,其显著性水平P<0.012,最小相关系数r=0.911。

2.3 氮输出路径

以每吨土壤中随泥沙累积流失的氮量占累积流 失总量的百分比表示其主要流失路径,不同降雨强度 下土壤氮流失途径见表1。未掺混秸秆时,土壤随泥 沙累积流失的氮占总流失量的比例达到98.25%~ 99.96%,掺混秸秆后,其比例为65.12%~99.12%,比未 掺混秸秆时小很多。表明氮主要通过吸附在泥沙上而 随泥沙一起流失,随径流流失的泥沙携带的氮是农田 非点源输出负荷的主要来源;秸秆还田可以在一定程 度上减少泥沙流失量,进而减轻农田非点源输出负荷。

3 讨论

3.1 氮输出的影响因素

研究表明,降雨强度增大,径流量与泥沙量增大,径流量与泥沙量增大^[8-9],径流中氮的总流失量也增大^[6,16];也有研究认为,降雨强度≥3.0 mm·min⁻¹时才会对泥沙中总氮含量产生显著影响^[18]。降雨强度与土壤入渗速率、坡面产流产沙量间有较好的正相关性^[7,9-10,16],雨强及径流

量与径流中氮总流失量间可用线性方程描述^[6-7],产 沙量与氮总流失量之间呈显著的幂函数关系^[7],也可 用多项式拟合^[18],累积产流量与累积氮流失量之间呈 线性正相关^[6,12]。雨强对总氮的平均含量影响显著, 在降雨强度为1.5、1.8、2.0 mm·min⁻¹时,总氮浓度分 别为0.6056、0.8011、1.3076mg·L^{-1[7]},氮输出浓度在 降雨产流初期(20 min左右)较高,随后呈波动性减 小,最终基本趋于一致,呈现明显的初期冲刷效 应^[6-7];产生径流后的0~35 min是累积氮流失量较快 的时段。适宜的氮肥施用量及控制产流前期养分流 失是防控冀南地区农业非点源污染的有效途径^[6]。

秸秆还田可降低土壤容重、增加孔隙度、改善土 壤结构^[21]、增加入渗,同时可阻滞地表径流,减少地表 径流对表层土壤的搬运,减少水土流失;秸秆覆盖度 与土壤累积入渗量正相关,与径流量和土壤流失量负 相关^[14],故能有效减少颗粒态氮流失^[13]。秸秆覆盖率 大于40%时能有效控制水土流失,但当覆盖度低于 40%时对控制水土流失的作用不明显;在土壤含水量 为10%、降雨强度为2.0 mm·min⁻¹的条件下,秸秆覆 盖能推迟起流时间1~15 min,增加累积入渗量37%~ 113%,减少径流总量3%~40%,减少土壤侵蚀10%~ 80%^[14]。

本研究中,降雨强度对径流、泥沙流失量、氮流失量均有显著影响,氮输出浓度也存在明显的20 min内初期冲刷效应,2.0 mm·min⁻¹降雨强度时平均输出浓度最大,3.0 mm·min⁻¹降雨强度对氮流失量的影响较显著,这与已有的研究基本一致^[6-7,18]。但径流、泥沙流失量在1.0 mm·min⁻¹以下的较低降雨强度之间、1.5 mm·min⁻¹以上的较高降雨强度之间的差异不显著,可能是存在引起径流与泥沙流失量类似"跃迁式"影响的降雨强度,这在其他研究中未见明确报道,这一降雨强度在未掺混秸秆时为1.0 mm·min⁻¹,掺混秸秆时为1.5 mm·min⁻¹。表明若能改善土壤渗透性能,

|--|

Table 1 Proport	ion of nit	trogen loss	by sedm	ient to t	total lo	ss(%)
-----------------	------------	-------------	---------	-----------	----------	-------

		降雨强度 Rainfall intensity/(mm·min ⁻¹)							
Treatment		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0		
	最小值 Minimum	98.25	99.73	99.71	99.54	99.92	99.69		
Fluvo aquic soil–No straw	最大值 Maximum	98.91	99.95	99.95	99.88	99.96	99.88		
	平均值 Average	98.67	99.90	99.90	99.71	99.94	99.79		
潮土-掺混秸秆	最小值 Minimum		65.12	84.17		88.26			
Fluvo aquic soil–Mixed straw	最大值 Maximum		96.77	97.07		99.12			
	平均值 Average		90.60	94.78		97.26			

则可以降低降雨初期的氮输出浓度与流失量,也可使 产生"跃迁式"影响的降雨强度得到提高,结合秸秆还 田措施在较低降雨强度下的控制作用,可使较低降雨 强度下不易产生径流或泥沙流失,或可减轻氮的输出 负荷。

3.2 氮输出路径

已有研究表明,随径流产生的泥沙流失是养分流 失的主要途径^[10],氮流失在试验降雨强度下均以颗粒 态为主,平均约占72%,但随着降雨强度增大,颗粒态 氮所占比例先减少后增加^[7];也有研究认为,99%以上 的氮、磷是随径流中的泥沙发生迁移的^[17];在大暴雨 和裸露地试验条件下,颗粒态氮是农田暴雨径流氮流 失的主要形态,减少地表径流和土壤侵蚀、降低表土 中速效氮养分含量是减少农田地表径流氮流失的关 键^[12]。

本研究潮土的氮总输出量中,随泥沙累积流失的 比例在未掺混秸秆时为92.8%~99.96%,与梁涛等^[17] 的结果较为接近,掺混秸秆后降低为59.69%~ 99.12%。表明氮主要随泥沙流失而输出,流失的泥 沙中所携带的氮是农田非点源输出负荷的主要来源; 秸秆还田可以在一定程度上减少泥沙流失量,进而减 轻农田非点源输出负荷。

4 结论

(1)径流、泥沙流失、氮流失量及其流失速率在降 雨初期增加,最终趋于平缓或下降,累积量稳定增加, 与降雨强度呈正相关;氮流失浓度具有初期冲刷效 应。秸秆还田具有一定的减轻泥沙流失的作用,但超 过一定降雨强度后,掺混秸秆后土壤的泥沙流失和氮 流失量会高于未掺混秸秆。

(2)可能存在引起径流、泥沙流失、氮流失量明显 变化的某一降雨强度,未掺混秸秆时为1.0 mm・ min⁻¹,掺混秸秆时为1.5 mm・min⁻¹。

(3)控制产流初期氮流失和水土流失是减少农田 非点源氮输出负荷的重要途径。

参考文献:

- [1] 武升,张俊森,张东红,等.小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J].环境污染与防治,2018,40(6):710-716. WU S, ZHANG J S, ZHANG D H, et al. Advances of agricultural non-point source pollution evaluation and comprehensive treatment in small watershed[J]. Environmental Pollution & Control, 2018,40(6):710-716.
- [2] 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. HAOSN, LIXY,

- [3] MALAGO A, BOURAOUI F, VIGIAK O, et al. Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River basin with SWAT[J]. Science of the Total Environment, 2017, 603/604; 196–218.
- [4] 刘庄, 晁建颖, 张丽, 等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在 问题[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):432-442. LIU Z, CHAO J Y, ZHANG L, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China[J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (3):432-442.
- [5] LENTZ R D, SOJKA R E, ROBBINS C W. Reducing phosphorus losses from surface-irrigated fields: Emerging polyacrylamide technology [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27:305–312.
- [6] 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 R H, MA B G, HUANG Z X, 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.
- [7] 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 M L, WU L, QIAO S S. Coupling simulation of runoff-sediment-nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3):1109-1116.
- [8] 邬伦,李佩武.降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J].环境科学 学报,1996,16(1):111-116. WUL,LIPW. Studies on rainfall process, flow-making and nitrogen and phosphorus losses[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1996, 16(1):111-116.
- [9] 邬燕虹, 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. WUYH, ZHANGLP, CHENRZ, et al. Reasearch 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.
- [10] 康玲玲,朱小勇,王云璋,等.不同雨强条件下黄土性土壤养分流 失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):536-543. KANG L L, ZHU X Y, WANG Y Z, et al. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities[J]. Acta Pedlogica Sinica, 1999, 36(4):536-543.
- [11] KIM M Y, JEE H K, LEE S T. Prediction of nitrogen and phosphorus transport in surface runoff from agricultural watersheds[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2006, 10(1):53–58.
- [12] 段永惠,张乃明,张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响 研究[J]. 土壤, 2005, 37(1):48-51. DUAN Y H, ZHANG N M, ZHANG Y J. Effect of fertilizer application on nitrogen and phosphorus loss with farmland runoff[J]. Soils, 2005, 37(1):48-51.
- [13] 黄满湘,章申,唐以剑,等.模拟降雨条件下农田径流中氮的流失 过程[J].土壤与环境,2001,10(1):6-10. HUANG M X, ZHANG S, TANG Y J, et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1):

6-10.

- [14] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2008,15(1):9-11. TANG T, HAO M D, SHAN F X. Effects of straw mulch application on water loss and soil erosion under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1):9-11.
- [15] 郭洪鹏,张维,宋文华,等.农业非点源污染研究方法分析[J].环境科学与管理,2018,43(2):135-138. GUO H P, ZHANG W, SONG W H, et al. Study on methods of agricultural non-point source pollution[J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(2):135-138.
- [16] RAMOSA M C, LIZAGAB I, GASPARB L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226:105789.
- [17] 梁涛,王红萍,张秀梅,等.官厅水库周边不同土地利用方式下氮、 磷非点源污染模拟研究[J].环境科学学报,2005,25(4):483-490.
 LIANG T, WANG H P, ZHANG X M, et al. Simulation study of nonpoint source pollution under different landuse in Guanting Reservoir

watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4):483-490.

- [18] 王国重, 李中原, 田颖超, 等. 雨强和土地利用方式对豫西南山区 氮磷流失的影响[J]. 人民长江, 2016, 47(7):18-22. WANG G Z, LI Z Y, TIAN Y C, et al. Effects of rainfall intensity and land use mode on loss of TN and TP in southwest hilly area of Henan Province [J]. Yangtze River, 2016, 47(7):18-22.
- [19] 刘晓凯. 杨农复合系统地表径流氮磷流失过程与影响因素研究 [D]. 南京:南京林业大学, 2012. LIU X K. Study on nitrogen and phosphorus losses process and influencing factors in Poplar-crop integrated systems through surface runoff[D]. Nanjing: Nanjing Forestry Unversity, 2012.
- [20] 魏克循.河南土壤地理[M].郑州:河南科学技术出版社, 1995.
 WEI K X. Soil geography of Henan Province[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1995.
- [21] 叶丽丽, 王翠红, 彭新华, 等. 秸秆还田对土壤质量影响研究进展
 [J]. 湖南农业科学, 2010(19):52-55. YE L L, WANG C H, PENG X H, et al. Effect of straw returning on soil quality[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010(19):52-55.

