

不同肥料类型及用量对坡面氮素流失的影响

曲芝旭¹, 韩玉国^{1,2}, 郭虎林¹, 安妙颖¹, 赵晨阳¹, 许盼¹

(1.北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;

2.北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为研究施用不同肥料类型(尿素、鸡粪)及用量(349.6, 174.8 kg/hm²)下坡面氮素流失规律, 采用人工模拟降雨试验方法, 探究二者氮素流失差异的原因, 并阐述肥料用量对氮素流失量的影响。结果表明: 施肥后坡面氮素流失以泥沙全氮流失为主, 占比可达78.16%~93.46%; 径流硝态氮浓度高于铵态氮浓度, 且径流总氮流失以硝态氮流失为主要形式, 流失量占径流总氮流失量的38.53%~48.62%。肥料类型对坡面泥沙全氮浓度影响不明显, 施用鸡粪处理泥沙硝态氮浓度和铵态氮浓度较高。等氮施用鸡粪可以减少坡面径流总氮、硝态氮和铵态氮流失浓度, 分别减少68.64%~74.23%, 70.09%~72.54%, 27.90%~39.45%。等氮鸡粪替代尿素可以减少坡面氮素流失总量的11.07%~15.81%, 减少径流总氮形式流失量70.55%~73.36%。坡面施氮量增加, 氮素流失浓度增加, 氮素流失总量也随之增加, 可增加6.00%~11.00%。全量鸡粪替代半量尿素可减少坡面氮素流失总量, 其效果较半量鸡粪处理下降10.40%。农业施用氮肥时, 应合理选择施用量, 并少量多次施用。尽量选择有机肥替代传统氮肥, 以减少地表径流氮素浓度。做好水土保持工作, 以降低水土流失携带大量的氮素对环境所造成的威胁。

关键词: 人工模拟降雨; 有机肥; 传统氮肥; 氮素浓度; 氮素流失量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0001-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.001

Effects of Different Fertilizer Types and Amounts on Slope Nitrogen Loss

QU Zhixu¹, HAN Yuguo^{1,2}, GUO Hulin¹, AN Miaoying¹, ZHAO Chenyang¹, XU Pan¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083; 2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: To study the law of nitrogen loss on slope under different fertilizer types (urea, chicken manure) and different dosages (349.6, 174.8 kg/hm²), the artificial simulated rainfall test method was used to explore the reasons for the difference in nitrogen loss between the two, and to elaborate the effects of fertilizer application rate on nitrogen loss. The results showed that the slope nitrogen loss after fertilization was mainly in the form of total nitrogen loss in sediment, accounting for 78.16%~93.46%. The concentration of runoff nitrate nitrogen was higher than that of runoff ammonium nitrogen, and the loss of total nitrogen in runoff was mainly in the form of nitrate nitrogen loss. The amount accounted for 38.53%~48.62% of the total nitrogen loss in runoff. The type of fertilizer had no obvious effect on the total nitrogen concentration of the slope sediment. The nitrate nitrogen concentration and the ammonium nitrogen concentration of the silt treated with chicken manure were higher. The equal nitrogen application of chicken manure could reduce the concentration of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in slope runoff, by 68.64%~74.23%, 70.09%~72.54%, 27.90%~39.45%, respectively. Equal-nitrogen chicken manure replacing urea could reduce the total nitrogen loss on slope surface by 11.07%~15.81%, and reduce the total nitrogen loss in runoff by 70.55%~73.36%. Increasing the amount of nitrogen applied on slopes would increase the concentration of nitrogen loss, and the total amount of nitrogen loss would also increase by 6.00%~11.00%. The full amount of chicken manure instead of half the amount of urea would reduce the total nitrogen loss on the slope by 10.40%. When applying nitrogen fertilizer in agriculture, the application rate should be selected reasonably with the low rate and high frequency. Try to choose organic fertilizer instead of traditional nitrogen fertilizer to reduce

收稿日期: 2021-05-07

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102, 2017ZX07102-001, 2017ZX07108, 2017ZX07108-002)

第一作者: 曲芝旭(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail: quzhixu0728@163.com

通信作者: 韩玉国(1979—), 男, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

the nitrogen concentration in surface runoff. The water and soil conservation should be done well to reduce the threat to the environment caused by the large amount of nitrogen in soil erosion.

Keywords: artificial rainfall simulation; organic fertilizer; traditional nitrogen fertilizer; nitrogen concentrations; nitrogen loss amount

尿素是固体氮肥中含氮量最高的肥料,其施用量已经占我国氮肥总施用量的 1/2 以上^[1]。尿素普遍存在使用不合理、利用率低等现象,降雨发生时造成大量氮素流失,进而引发严重的环境污染^[2-3]。国内外学者^[4-7]为此提出了许多解决办法,其中有机肥替代被认为是一种可以有效减少农业氮素流失的方法^[8]。有机肥具备满足作物生长所需养分、改善土壤质地等诸多优点^[9],近年来被作为区域农业面源污染防治中化肥的最佳替代品^[8]。

使用有机肥可以补充土壤碳源,使土壤碳氮比上升,优化土壤物理、化学和生物性状,增加土壤抗逆性^[10]。但随着深入研究有机肥^[11]发现,施用有机肥使地表径流总氮浓度上升^[12],也使流失的土壤全氮和硝态氮浓度升高。Tabbara^[13]研究发现,超量施用有机肥引起周围水环境恶化,引发水体富营养化;Gaudreau 等^[14]研究发现,有机肥施用量越高,氮素流失量越大。因此不合理的施用有机肥也可能造成氮素流失,进而引发面源污染。国内目前关于有机肥氮素流失过程的研究较少,尤其是针对施用不同有机肥施用量对氮素流失量的定量化研究更少,且国内许多重大水污染治理项目均提出使用有机肥替代化肥来改善流域出口水质的想法。目前针对有机肥的正面评价较多,忽略了其本身也有可能引发的环境问题。

因此,本研究拟选择不同肥料类型开展研究,分析降雨条件下不同肥料类型的氮素流失规律,探究二者氮素流失差异的原因,并根据不同肥料用量下的氮素流失特征,阐述肥料用量对氮素流失量的影响,为今后更加合理使用氮肥提供依据,同时也为区域农业面源污染防治及测算提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用土采集于北京门头沟耕地 0—35 cm 无种植区域土壤,土壤类型为碳酸盐褐土,母质类型为黄土,试验前采集土壤混合样品,测定理化性质,土壤 pH 为 8.3,全氮含量 2.40 g/kg,碱解氮含量 0.21 g/kg,有机质含量 16.70 g/kg,土壤中黏粒(<0.001 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)的含量分别为 9.83%,53.50%,36.74%。鸡粪为干鸡粪,出厂含氮量为 1.20%。

1.2 试验设计

模拟降雨试验于 2019 年 8 月在鹫峰人工降雨大

厅开展。试验土槽规格为 3 m×0.5 m×0.5 m(长×宽×高),底部打孔用以渗水,试验槽下部设置“V”形集流口,以便收集坡面产流产沙。根据自然侵蚀和加速侵蚀的临界值,设置坡度为 5°。根据北京地区侵蚀性强降雨特征^[15],选择降雨强度为 90 mm/h;根据走访调查,门头沟地区实际施用量为 349.60 kg/hm²,折算出鸡粪施用量(近似氮素折存量相同),并设置减半处理。不同处理下每场降雨设置 3 个相同土槽。试验设计见表 1。

表 1 4 次降雨事件试验设计

降雨事件	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/min	土槽 坡度/(°)	肥料 类型	施用量/ g	氮素折存 量/g
鸡粪—全量	90	90	5	鸡粪	4400	52.80
鸡粪—半量	90	90	5	鸡粪	2200	26.40
尿素—全量	90	90	5	尿素	114	52.44
尿素—半量	90	90	5	尿素	57	26.22

注:全量施用肥料氮素折存量等同于门头沟地区实际施用量。

1.3 试验方法

试验土壤先去除杂质后过 4 mm 孔筛网,并风干、均匀混合。在土槽最底部铺上 4 层纱布,纱布中间覆上 5 cm 厚沙子。土槽内土层厚度为 35 cm,计算称量使装槽密度为 1.26 g/cm³,填装上层土料之前,抓毛下层土壤表面。表层 5 cm 土壤混施氮肥后,耙平坡面,并沉降 4 h。在试验开始前 4 h,对坡面进行雾状喷水,以保证上层土壤含水量饱和,喷水过程中避免坡面表层形成结皮,降雨前采用烘干法测定坡面 3 处土壤含水量(表 2)。开始降雨前对降雨强度进行率定,并保证雨区均匀度>90%,实测雨强与目标强度的差值<5%正式开始降雨。

表 2 4 次降雨事件土壤含水量及降雨均匀度

降雨事件	初始平均 含水量/%	实际降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 均匀度/%
鸡粪—全量	29.87	89	92
鸡粪—半量	28.71	90	90
尿素—全量	31.72	93	95
尿素—半量	31.98	89	94

降雨开始时记录开始降雨时间和初始产流时间。产流开始后,由于产流初期坡面径流泥沙量变化较大,故前 5 min 内,用塑料小桶分别在 1,3,5 min 收集 3 次径流样;此后每间隔 10 min,用径流大桶收集径流样。降雨历时 90 min 时,降雨停止,收集尾样,并记录产流停止时间。称量桶中水沙混合样重量,过滤得到澄清水样和土样。水样放入 4℃冷储存柜中

保存,泥沙烘干后封袋保存,所有样品在 24 h 内进行室内分析。

1.4 样品测定

采用称重法换算出径流量与径流含沙量,水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,用连续流动注射分析仪直接测硝态氮(NO_3^-)、铵态氮(NH_4^+),径流总氮(TN)是澄清水样直接使用碱性过硫酸钾消解后,使用连续流动注射分析仪测定。泥沙全氮用开氏消解后,采用连续流动注射分析仪测定,泥沙用 $2\ \text{mol/L}$ KCL 溶液浸提后,用连续流动注射分析仪测定滤液中硝态氮(NO_3^-)、铵态氮(NH_4^+),氮素浓度计算方法为处理组氮素含量减去降水/土壤本底值氮素含量。

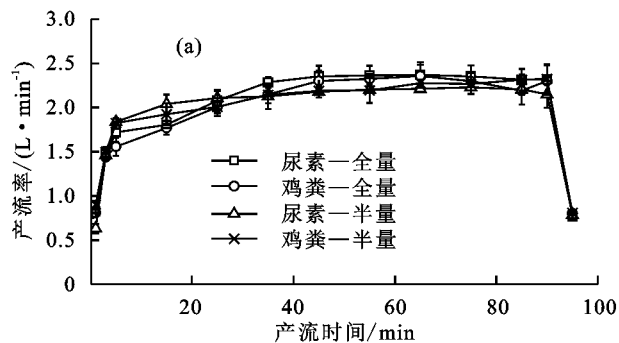
1.5 数据分析

降雨过程数据均为 3 个土槽坡面测定数据取平均值,利用 Excel 2016 和 SPSS 26 软件进行初步数据整理及分析,采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 产流产沙过程

坡面产流产沙量是判定土壤侵蚀程度的重要依



据,本研究中施用不同量尿素或鸡粪下坡面在降雨过程中产流率变化曲线见图 1a。不同处理下坡面产流率随产流时间的变化趋势相似,均表现为产流初期产流率较小,随着降雨的继续,产流率逐渐增加,并在一定时间后保持稳定。这是由于土壤水分逐渐达到饱和,入渗过程也逐渐稳定^[16-17]。4 次处理产流稳定时间均在 40 min 附近,稳定于 $2.30\ \text{L/min}$ 左右,且累计产流量也无显著性差异($P>0.05$)。

图 1b 为不同处理下坡面产沙率变化曲线,各处理间有相似的产沙率曲线,均表现为产流初期产沙率较低,仅为 $35\ \text{g/min}$ 左右,随后迅速上升达到 $110\ \text{g/min}$ 左右,然后逐渐下降并在产流 80 min 后趋于稳定,稳定于 $62\ \text{g/min}$ 附近。这是由于降雨初期,径流作用较弱,导致侵蚀强度较低。随着降雨的进行,径流作用急剧增加,加之坡面松散土壤较多,在冲刷作用下,被快速运移出坡面。随后由于易搬运土壤减少,且径流作用趋于稳定,导致产沙率逐渐降低并趋于稳定^[17]。不同处理下,累计产沙量也无显著性差异($P>0.05$)。

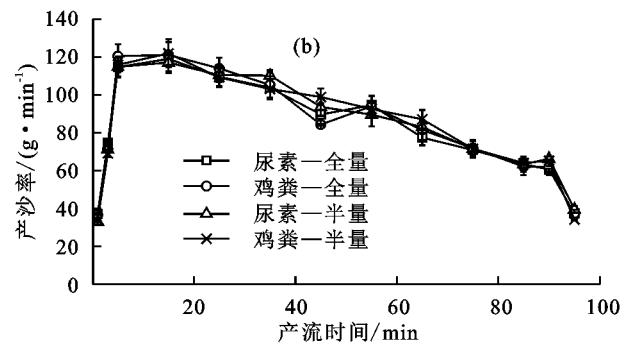


图 1 坡面产流产沙特征

2.2 坡面氮素浓度流失过程

坡面产流产沙所携带的养分是坡地养分流失的主要部分,故分析径流泥沙各形式氮素有助于全面了解坡面氮素流失特征。由图 2 可知,不同处理下坡面径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度有差别,但整体趋势相似,表现为随着产流时间先升高然后缓慢下降,并在一定范围内呈“锯齿状”波动,末期有小幅上升。这是由于产流初期,坡面径流量小,携带氮素能力弱;但随着径流量的增加,氮素随径流急速流出;随着降雨的进行,径流量逐渐稳定,氮素相对减少,径流稀释作用明显,氮素流失浓度逐渐下降。由于结皮的生成和破坏是呈周期性变化的,当旧结皮被破坏时,浸提和溶解作用明显,溶解于径流中的氮素增加,泥沙吸附的氮素也会增加,故氮素浓度上升,但当新的结皮产生时,土壤表面变得致密,径流稀释作用明显,导致氮素浓度下降;当降雨结束后,径流量迅速下降,使得汇流时间加长,增加了径流与表层土壤的作用时间,且径流稀释作用减弱,二者综合导致径流氮素浓度呈小幅

上升^[18-20]。

由图 2a 可知,与施用尿素相比,等氮施用鸡粪降低了坡面径流总氮浓度 $68.64\%\sim 74.23\%$,施用尿素坡面径流总氮浓度在 $18.00\sim 28.00\ \text{mg/L}$ 附近波动,浓度较高,而施用鸡粪坡面径流总氮浓度在 $5.00\sim 8.00\ \text{mg/L}$ 附近波动,浓度较低。这是由于鸡粪中可溶性氮素含量较低^[21],绝大部分以不可溶有机态氮形式存在^[22],导致在降雨—径流过程中被浸提的氮素浓度较少,故浓度较低。而尿素易溶于水,遇水后以分子态存在于土壤溶液中,在径流与土壤作用过程中迅速释放,使其浓度水平较高。

由图 2b、图 2c 可知,与施用尿素相比,等氮施用鸡粪降低坡面径流硝态氮、铵态氮浓度,分别降低 $70.09\%\sim 72.54\%$, $27.90\%\sim 39.45\%$ 。不同处理下,坡面径流硝态氮浓度均高于径流铵态氮浓度,这种现象在尿素处理坡面尤为明显。尿素处理坡面径流硝态氮浓度在 $7.00\sim 12.00\ \text{mg/L}$ 附近波动,是同处理径流铵态氮浓度的 15 倍左右;鸡粪处理硝态氮浓度

也是铵态氮浓度的 10 倍以上。这是由于试验用土为黄土,土质疏松^[23],透气性好,且在夏季开展,气温较高,尿素水解作用和铵态氮硝化作用明显^[24],施入土壤中的氮肥迅速转化为硝态氮形式,且由于土壤胶体带负电荷,故硝态氮不能与土壤胶体聚沉,极易随水移动,加之铵态氮与硝态氮相反,其带正电荷,容易被土壤胶体吸附^[25],故不同处理下坡面径流硝态氮浓

度高于径流铵态氮浓度。

由图 2 可知,对于施用同种类型肥料(尿素或鸡粪)坡面,全量处理比减半处理径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度高,这是由于本研究中,不同处理下坡面产流产沙过程相似,即雨滴和径流对坡面土壤的扰动效果相差不大,氮肥施入量增加会增加可溶性有机态氮或分子态氮的含量,进而浓度上升。

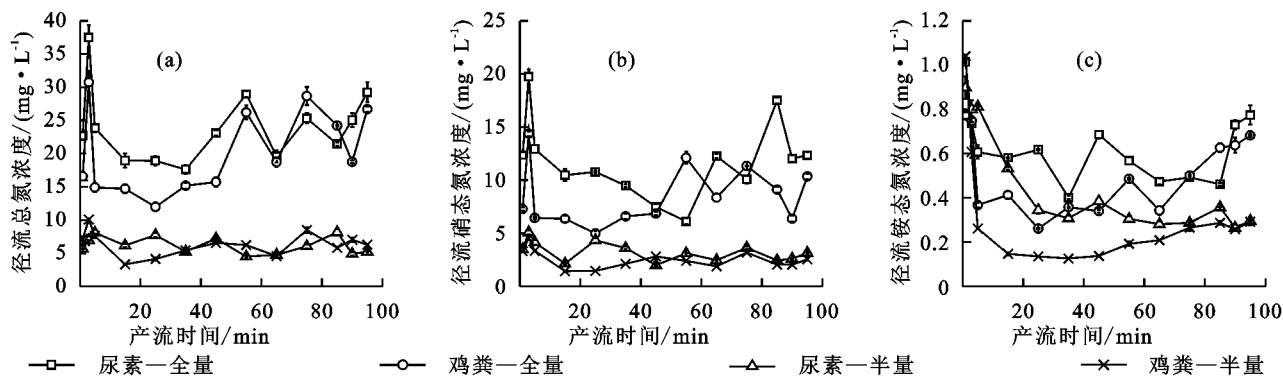


图 2 坡面径流各形式氮素流失浓度过程

由图 3a 可见,相比于径流氮素浓度,泥沙全氮浓度规律性不明显,不同肥料类型处理间浓度相差不大,在 1.50~2.50 g/kg 波动,但全量施肥处理泥沙全氮浓度稍高于半量处理;由图 3b、图 3c 可知,与施用尿素相比,等氮施用鸡粪可以增加土壤硝态氮和铵态氮浓度,分别增加 9.26%~18.09%,13.85%~17.58%;全量施肥处理泥沙硝态氮和铵态氮浓度高于半量处

理。等氮条件下,施用鸡粪处理下坡面泥沙硝态氮浓度和泥沙铵态氮浓度较施用尿素处理高。这是由于土壤氮素主要以有机态氮形式存在^[26-27],其本身所含铵态氮和硝态氮含量较低,且降雨强度较大,吸附作用较弱,加之鸡粪本身带有一定量的硝态氮、铵态氮^[28],在雨滴分散、径流冲击作用下,更容易被带出口断面。

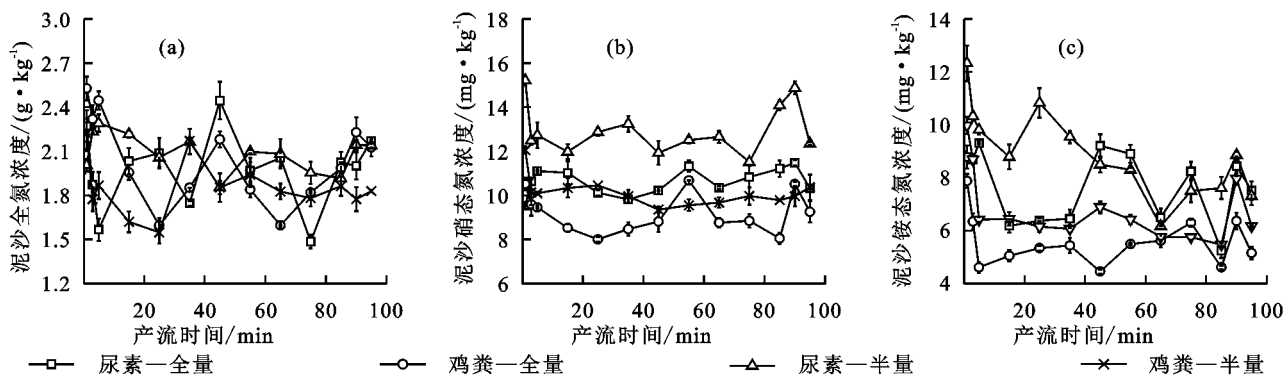


图 3 坡面泥沙各形式氮素流失浓度过程

2.3 坡面氮素流失量

氮素流失量作为评价区域氮素面源污染的主要监测指标,对养分流失控制效应具有指示意义。坡面氮素流失量是径流量和泥沙量与其浓度乘积之和,由上述研究结果可知,不同处理下坡面产流产沙过程相似,且产流量和产沙量差异不显著($P>0.05$),导致坡面氮素流失量与浓度关系密切,具体流失量见表 3。不同处理下,泥沙全氮为坡面氮素流失的主要形式,占比可达 78.16%~93.46%;径流总氮流失主要以硝态氮为主,占比 38.53%~48.62%;减量施肥可以减少坡面氮素流失 6.00%~11.00%,其中尿素处理坡面施用量减半可以减少氮素流失 1 218.98 mg

(6.00%),鸡粪处理坡面施用量减半可以减少氮素流失 1 991.17 mg(11.00%);施用鸡粪可以减少降雨过程中坡面氮素流失 11.07%~15.81%,其中可以减少以径流形式流失的氮素 70.55%~73.36%。

3 讨论

国际肥料工业协会(IFA)^[29]指出自然界所有处于自然状态的土壤都缺乏作物生长所需的氮,如果在从事农业生产过程中不补充养分,会引发土地养分资源的枯竭和作物产量下降等现象。因此人们开始使用化肥、种植固氮作物或施用有机氮源(有机肥)来维持、增加土壤养分含量。适当的氮肥投入可以提高土壤肥力,保证粮食安全,但是氮肥的过多投入会造成

“高投入,低回报”的尴尬局面,导致环境污染,对人类自身健康产生诸多不利影响。因此,合理施肥以提高肥料利用效率则显得尤为重要。我国学者^[30-31]普遍认为,合理施氮量的范围应在 150.00~250.00 kg/hm²,而北京门头沟区耕地土壤尿素施用水平为 349.60 kg/

hm²,存在施用量过多现象。按照本试验条件,土槽坡度 5°、土槽表面积 1.5 m²,可推算此施氮水平可能会造成 135.71 kg/hm²的氮素流失,使环境对氮营养物质负荷加重,产生水体富营养化。若其进入地下水,还将影响饮水安全,故应当减少施氮量。

表 3 坡面氮素流失总量 单位:mg

氮素形态	鸡粪—全量	鸡粪—半量	尿素—全量	尿素—半量
径流总氮	1184.25±109.01a	1123.01±82.7a	4445.81±355.14b	3813.24±245.76b
径流硝态氮	575.78±48.66a	432.72±30.72a	2145.11±161.55c	1599.23±100.53b
径流铵态氮	69.27±5.55b	39.82±2.74a	109.71±7.54c	84.48±4.53b
泥沙全氮	16919.37±1144.07a	14989.44±1220.81a	15910.80±1433.48a	15324.39±1109.77a
泥沙硝态氮	103.52±6.66b	81.97±5.67a	85.42±6.16ab	71.96±5.50a
泥沙铵态氮	70.84±5.49b	52.07±3.67a	58.51±5.31ab	43.28±3.60a
流失总量	18103.62±1253.07a	16112.45±1303.51a	20356.60±1788.63a	19137.63±1355.53a

注:表中数据为平均值±标准误, $n=3$;数据后不同字母表示不同处理下氮素形态的差异显著($P<0.05$)。

根据表 3 可知,尿素施用量减半情况下可以减少 8.13 kg/hm² 的氮素流失,其中减少以径流形式流失的氮素 14.00%,此结果与罗付香等^[32]在紫色坡耕地得出的尿素施用量减半可以减少地表径流总氮流失量,平均减少 13.00%的结果一致。其他学者^[33]也得到了相似的结论,故认为流失氮素含量与尿素施用量密切相关,尿素施用量越大,流失总量越高,对环境的污染也越大,故门头沟地区应适当减少氮肥施用量。根据本研究结果,可以采用有机肥等来代替传统尿素以减少农业面源污染,可以减少氮素流失 11.07%~15.81%。但在实际情况存在偏差。由于有机肥中养分存在不平衡,又缺乏明确的施用建议,加之部分农民科学思维缺失,盲目甚至成倍施用有机肥。由本研究可知,等氮有机肥代替尿素,可以有效减少氮素流失总量(20.17 kg/hm²),尤其是减少以径流形式流失的氮素(70.55%)。而如果不注意有机肥的施用量,那么过量有机肥代替尿素时,虽然仍可以起到较少氮素流失的作用,但减少的氮素流失总量仅为 6.89 kg/hm²,效果下降了 10.40%,不仅造成资源浪费,还会增加对环境的污染。

由坡面径流氮素浓度变化过程表明,施肥坡面降雨初期径流氮素浓度较高,降低该时期径流氮素浓度可有效防治农业区域面源污染。且由上述研究结果可知,减量施肥也可减少径流氮素浓度和流失量,故在从事农业生产时,应多次少量施肥,即采取在雨前少施肥、雨后补肥的施肥策略。由表 3 可知,不同处理下,泥沙为坡面氮素流失的主要形式,占比可达 78.16%~93.46%,说明不论施用化肥还是有机肥,泥沙仍是防控的主要目标,因此在从事农业生产时应当采取增加地表覆盖的水土保持措施^[34],如秸秆覆盖、留茬耕作等或采用间作套种的生产方式来避免土壤侵蚀的发生。根据本研究可知,施用鸡粪增

加土壤硝态氮和铵态氮浓度的效果较好,且使用鸡粪替代尿素可以减少径流形式流失的氮素 70.55%~73.36%,故在泥沙得到较好的控制下,施用鸡粪不仅可以提高土壤肥力,还可以使因施肥导致的区域面源污染得到有效控制。

综上所述,农业生产施用氮肥时,应保证粮食安全的前提下,合理选择其施用量,避免造成资源浪费和环境污染问题。农业生产应当采取少量多次施肥方式,做好水土保持相应措施,避免发生严重的土壤侵蚀。尽量选择有机肥替代传统氮肥,以减少可能带来的肥料利用率低、氮素流失严重等问题,但有机肥施用量也需仔细斟酌,不可盲目多施。

4 结 论

(1)不同肥料类型及用量下坡面产流产沙过程相似,并且坡面产流量和产沙量差异不显著,即产流量和产沙量不是引起氮素流失差异的原因;泥沙全氮流失总量占坡面总流失量的 75%以上,表明泥沙全氮为施肥后坡面氮素流失的主要形式;径流硝态氮浓度是径流铵态氮浓度的 10 倍以上,且径流总氮流失以硝态氮流失为主要形式。

(2)不同肥料类型下泥沙全氮流失规律不明显;施用鸡粪处理泥沙硝态氮浓度和铵态氮浓度较高;等氮施用鸡粪可以减少坡面径流总氮浓度、硝态氮浓度和铵态氮浓度;等氮鸡粪替代尿素可以减少坡面氮素流失量,且主要通过减少径流总氮流失来实现。坡面施氮量增加,氮素流失浓度增加,氮素流失总量也随之增加。

(3)农业生产施用氮肥时,应合理选择施用量,采取少量多次的施肥策略,增加施肥深度,做好水土保持相应措施。

参考文献:

[1] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies

- reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [2] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨下 2 种尿素的坡地氮素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 26-30.
- [3] Sugar D, Righetti T L, Sanchez E E, et al. Management of nitrogen and calcium in pear trees for enhancement of fruit resistance to postharvest decay[J]. *Hort Technology*, 1992, 2(3): 382-387.
- [4] 何杰, 张敬昇, 王昌全, 等. 包膜控释氮肥配施尿素对冬小麦产量与氮素积累及利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 34-42.
- [5] 任静, 刘小勇, 韩富军, 等. 供氮水平与地面覆沙对苹果幼树¹⁵N—尿素吸收分配及利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 135-142.
- [6] 魏蓉, 田晓飞, 翟胜, 等. 包膜尿素与保水剂配施对冬小麦生长和氮素利用的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4): 936-942.
- [7] 林超文, 庞良玉, 罗春燕, 等. 平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5552-5560.
- [8] Geng Y H, Cao G J, Wang L C, et al. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution[J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219512.
- [9] 夏红霞, 朱启红, 刘希东, 等. 模拟径流试验条件下紫色土有机肥氮素流失特征研究[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(6): 74-83.
- [10] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783-795.
- [11] 龚文, 张怀志, 李永梅, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同有机肥用量的农田氮素流失研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, 47(2): 16-20.
- [12] 韩笑, 席运官, 田伟, 等. 有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(3): 465-473.
- [13] Tabbara H. Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 1044-1052.
- [14] Gaudreau J E, Vietor D M, White R H, et al. Response of turf and quality of water runoff to manure and fertilizer[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(4): 1316-1322.
- [15] 孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. *气象学报*, 2015, 73(4): 609-623.
- [16] 王冉, 童菊秀, 李佳韵, 等. 模拟降雨条件下农田裸地氮素随地表径流流失特征[J]. *中国农村水利水电*, 2018, 60(5): 37-42.
- [17] 李苗, 王晓, 庞宗强, 等. 沛沿河流域农田地表径流氮流失的模拟研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(12): 18-21.
- [18] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 三峡库区典型小流域农业非点源氮磷流失特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1720-1725.
- [19] 徐畅, 谢德体, 高明, 等. 三峡库区小流域旱坡地氮磷流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 1-5.
- [20] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的 CT 扫描分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4166-4169.
- [21] 周博, 朱振国, 周建斌, 等. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 714-718.
- [22] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 247-254.
- [23] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1687-1695.
- [24] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 393-404.
- [25] 秦巧燕, 贾陈忠, 同延安, 等. 施用氮肥对设施栽培土壤硝态氮累积量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(1): 152-153.
- [26] 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 等. 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4717-4726.
- [27] 高涵, 肖礼, 牛丹, 等. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3825-3832.
- [28] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 930-936.
- [29] Hofman G, Cleemput O. Soil and plant nitrogen[EB/OL]. [2020-10-12]. https://www.fertilizer.org/Public/Resources/Library/Public/About_Fertilizers/Library.aspx?hkey=e3ef0fa4-1b25-4be7-9d47-5045562964a0.
- [30] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 42-54.
- [31] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 116(6): 1-40.
- [32] 罗付香, 林超文, 涂仕华, 等. 紫色坡耕地玉米适产和环境友好的氮肥投入阈值[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(2): 625-631.
- [33] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2009, 332(4): 385-392.
- [34] 张祎帆, 赵清贺, 丁彦彦, 等. 坡度和植被盖度对粉砂质河岸带坡面流侵蚀水力特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2488-2498.