

青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响

赵桂茹, 安瞳昕, 欧阳钺人, 邓宗澳, 吕凯, 杨友琼, 周锋, 吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 为探讨不同氮投入对红壤坡耕地水土流失及土壤水稳性团聚体的影响, 在种植青贮玉米的坡耕地上设置 4 个不同氮投入处理(N1: 300.00 kg/hm²; N2: 225.00 kg/hm²; N3: 150.00 kg/hm² 和 N4: 75.00 kg/hm²), 用湿筛法获得 >2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 mm 粒径的团聚体组分并计算出水稳性团聚体含量(WSA_{>0.25})、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(PD)的含量。结果表明: (1) 不同氮投入处理的坡面产流产沙特征与降雨强度关系密切, 在低强度、中强度和高强度降雨条件下, N1 和 N2 处理的径流量和产沙量均显著小于 N3 和 N4 处理($P < 0.05$), N2 与 N1 处理径流量及产沙量差异均未达到显著水平($P > 0.05$), 但在极高强度降雨下, 各处理径流量和产沙量的差异均不显著($P > 0.05$)。 (2) N2 处理的 WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 比其他 3 个处理大, 而 PD 却比较小, 此外, WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 三者之间相互存在极显著正相关性($P < 0.01$), 而与 PD、径流量和产沙量均呈现出极显著负相关关系($P < 0.01$)。 (3) N1 和 N2 处理土壤容重显著低于 N3 和 N4 处理的容重($P < 0.05$), 但其孔隙度和田间持水量显著高于 N3 和 N4 处理($P < 0.05$)。因此, 在当地常规施肥水平上减少 25% 氮投入量不会加剧土壤侵蚀, 还可通过改善土壤物理性质以维持红壤坡耕地的生产能力。

关键词: 青贮玉米; 氮投入; 土壤侵蚀; 土壤团聚体; 稳定性

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0072-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.011

Impact of Nitrogen Input of Silage Maize on Soil Erosion and Water-stable Aggregates in Sloping Farmland

ZHAO Guiru, AN Tongxin, OUYANG Chengren, DENG Zongao,

LÜ Kai, YANG Youqiong, ZHOU Feng, WU Bozhi

(Key Laboratory for Crop Production and Smart Agriculture of Yunnan Province,

Faculty of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: In order to explore the effects of different nitrogen inputs on soil erosion and soil water-stable aggregates in red soil slope farmland, four nitrogen treatments including N1(300.00 kg/hm²), N2(225.00 kg/hm²), N3(150.00 kg/hm²) and N4(75.00 kg/hm²) were designed, and the runoff and sediment yield were measured during the whole growth period of silage maize. Meanwhile, the aggregate components with particle size >2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5 and <0.25 mm were obtained by wet screening method, and the content of water-stable aggregates (WSA_{>0.25}), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and parting dimension (PD) were calculated. The results showed that: (1) The characteristics of runoff and sediment yield of different nitrogen inputs were closely related to rainfall intensity. The runoff and sediment yields of N1 and N2 treatments were significantly lower than those of N3 and N4 treatments under the condition of low, medium and high intensity rainfall ($P < 0.01$), and there was no significant difference in runoff and sediment yield between N1 and N2 treatment ($P > 0.05$). Whereas, the differences in runoff and sediment yield were not significant among different treatments under extremely high intensity rainfall ($P > 0.05$). (2) WSA_{>0.25}, GMD and MWD of N2 treatment were higher than those of the other three treatments, but the PD was relatively low. Additionally, there was a very significant positive correlation among WSA_{>0.25}, MWD and GMD, but an extremely significant negative correlation with PD, runoff and sediment yield. (3) The soil bulk densities of N1 and N2 treatments were significantly lower than those of N3 and N4

收稿日期: 2021-04-16

资助项目: 云南省重点研发计划项目(2018BB015); 云南省重大科技专项—绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG00902)

第一作者: 赵桂茹(1989—), 女, 在读博士研究生, 主要从事作物品种与生态多样性种植研究。E-mail: 704136137@qq.com

通信作者: 吴伯志(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物多样性种植可持续发展研究。E-mail: bozhiwu@outlook.com

treatments ($P<0.01$), but the porosity and soil water holding capacity of N1 and N2 treatments were significantly higher than those of N3 and N4 treatments ($P<0.05$). Therefore, reducing 25% of nitrogen input at the local fertilization level will not aggravate soil erosion, and improve the soil physical properties to maintain the productivity of red soil sloping farmland.

Keywords: silage maize; nitrogen input; soil erosion; soil aggregates; stability

土壤侵蚀是全球范围内普遍存在的环境问题,是影响粮食安全、生态农业以及社会经济可持续发展的主要因素之一^[1]。目前,全球受土壤侵蚀影响的土地面积为 1.09 亿 hm^2 ,其中 0.75 亿 hm^2 土地受到严重影响^[2],估计全球每年约有 1 000 万 hm^2 农田因土壤侵蚀而丧失生产力,其速度是土壤形成的 20 倍^[3]。土壤侵蚀不仅是降雨侵蚀动力与土壤抗侵蚀力相互作用的过程,还是一个由物理、化学以及生物的多重机制相互作用形成的复杂动态过程^[4],而土壤作为水土流失的物质基础,其被侵蚀的程度受作用于地表土层外营力影响外,还与土壤本身性质密切关联。

从影响土壤侵蚀的土壤物理性质来看,如耕作层土壤容重、土壤质地、渗透性、毛细管孔隙度、团聚体的水稳性和田间持水量等都是反映土壤抗侵蚀性能的重要参数^[5]。其中土壤团聚体稳定性影响着土壤入渗、结皮、产沙等土壤侵蚀的各个过程,其在降雨情况下被破坏机制主要包括消散作用(快速湿润条件下土壤团聚体中空气压缩产生的应力而引起的破碎)、机械作用(雨滴打击和径流搬运等)、黏粒膨胀作用(土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破碎)和土壤物理—化学分散破坏作用^[6],因此,土壤团聚体稳定性是预测土壤抗侵蚀能力的重要指标之一。

通常,土壤团聚体稳定性可以体现出土壤结构的稳定性,但其会受到耕作措施的重要影响。已有研究^[7-8]表明,化肥配施有机肥可提高水稳性大团聚体含量,从而改善土壤团聚体的结构;此外,比起施肥措施,施肥年限对土壤团聚体含量变化及稳定性具有更显著的影响,>2 mm 土壤团聚体的含量及其稳定性随着施肥年限的增加而增加^[9]。关于化肥配施有机肥对土壤团聚体的影响已得到国内外学者的广泛关注,但缺乏关于氮肥投入对坡耕地土壤团聚体的相关报道。

坡耕地一直是土壤侵蚀研究与防治的重点对象,而施肥作为农业实践中的关键管理措施,特别在坡耕地农业生产中显得极其重要,因此,对坡耕地开展不同氮肥投入研究,这对我国有效防治坡耕地水土流失和综合利用具有深远意义。一定程度上,不同施肥方式对坡耕地的土壤侵蚀影响较大,并且已有大量研究^[10-14]。龚伟等^[12]研究表明,与不施肥处理相比,化肥氮磷钾两者或三者之间配施均可改善土壤物理性质和提高土壤抗蚀能力;相对于顺坡耕作单施化肥,

横坡垄作加化肥配施有机肥可以降低坡耕地径流量及加快入渗速率^[13]。相同耕作模式有机肥替代化肥施用,因作物生长不好有较大的产流量^[14]。但目前的研究还缺乏关于氮投入对坡耕地的水土流失及土壤团聚体稳定性影响的综合分析。因此,本研究以青贮玉米为对象,分析红壤坡耕地水土流失特征及土壤水稳性团聚体的稳定性对不同氮投入的响应,以期为山区绿色农业持续发展提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于云南农业大学教学农场(25°18'N,102°45'E),海拔 1 930 m。该区域属于低纬度高原季风气候,年平均气温 14.5 °C,年平均降水量 960 mm,降雨主要集中在 5—10 月,全年日照时间 2 617 h。试验地土壤为旱地红壤,耕作层(0—20 cm)的土壤有机质含量 35.51 g/kg,全氮含量 2.15 g/kg,全磷含量 2.25 g/kg,全钾含量 10.15 g/kg,碱解氮含量 80.29 mg/kg,速效磷含量 100.36 mg/kg,速效钾含量 170.30 mg/kg,pH 为 7.53。试验总用 12 个径流小区,小区面积 30 m^2 (10 m×3 m),坡度为 10°,设置 50 cm 隔离带,每个径流小区底部有 1 个 1 m×1 m×1 m=1 m^3 的蓄水池,内置体积约 250 L 桶,用于测量小区的径流量和侵蚀量。

1.2 试验设计

供试品种:玉米(*Zea mays* L.),青贮玉米品种为“曲辰 9 号”(云南曲辰种业有限公司),种植密度为 90 660 株/ hm^2 ;试验时间分别为 2019 年 5 月 12 日播种至 2019 年 9 月 10 日收获和 2020 年 5 月 22 日播种至 2020 年 9 月 23 日收获。

2019 年,试验设 3 个不同氮投入处理:N1(常规施肥水平)、N2(常规施肥水平基础减 25%)、N3(常施肥水平基础减 50%);2020 年,试验处理设 4 个不同氮投入处理:在 2019 年 3 个试验处理基础上增加 N4(常施肥水平基础减 75%),每个处理设 3 个重复,氮肥分 3 次施用,即底肥、苗肥、穗肥,其比例为 3:2:5,苗肥、穗肥在每个小区按照预设施氮量挖穴,然后覆土盖肥。具体纯氮施用量及时期见表 1。采用打塘穴播,种植行距和塘距分别为 60,40 cm。肥料种类:尿素、普钙(过磷酸钙)、硫酸钾、商品有机肥。施肥方式:苗肥和穗肥均施在距离玉米根系 5 cm 处。

表 1 玉米生育期内的氮投入量

单位: kg/hm ²				
处理	总氮量	底肥	苗肥	穗肥
N1	300.00	90.00	60.00	150.00
N2	225.00	67.50	45.00	112.50
N3	150.00	45.00	30.00	75.00
N4	75.00	22.50	15.00	37.50

1.3 观测项目与方法

气象数据观测方法:在云南农业大学教学农场试验地旁边安装无线集成自动观测气象站(美国 Davis,Vantage Pro 2)。通过软件自动生成 NOAA 气象报告和趋势分析,通过配备 GPRS 或 CDMA 远程数据传输模块实现远程控制和数据传输。

小区地表径流量($V,\text{m}^3/\text{hm}^2$)计算公式为:

$$V=(\frac{1}{3}\pi h(r^2+R^2+rR))\div(1000\times 30) \quad (1)$$

式中: h 为径流水深(cm); r 为塑料桶下底面半径(cm); R 为上底面半径(cm)计算小区径流量。

产沙量($M,\text{kg}/\text{hm}^2$)计算公式为:

$$M=\frac{m}{V_1}\times V$$

式中: m 为烘干至恒重的径流水样泥沙质量(g); V_1 为水样体积(mL); V 为公式(1)的小区地表径流量(m^3/hm^2)。

本试验分别于 2019 年 9 月 11 日和 2020 年 9 月 24 日收获玉米后,采集 0—20 cm 表层原状土用作土壤团聚体稳定性特征分析。在玉米成熟期取检测土壤水稳性团聚体的土样,用湿筛法测定土壤中过孔径 2,1,0.5,0.25,<0.25 mm 的团聚体含量。采集 0—20 cm 土层的土样约 1 000 g 装入保鲜盒中,防止运输过程中被破坏。在室内风干过程中及时地沿风干形成的自然裂隙,用手掰成直径在 1 cm 以上的小土块,用四分法称取 100 g 风干土样。其次,将土筛从上到下筛孔由大到小的顺序套牢,把已经准备好的 100 g 土小心放置于依次叠好的孔径为 2,1,0.5,0.25 mm 的套筛上,慢慢浸入放有足够蒸馏水的桶里,然后将套架组固定到团聚体团粒分析仪的振荡架上,静置 30 min。再次,以振幅 3 cm、30 次/min 的频率上下振荡 1 min(整个振荡过程中套筛上缘部分不得超出水面),将各级筛子上的团聚体洗入已知重量的烧杯中,在 60 ℃ 条件下烘干称重,室温保存。分别得到>2,1~2,0.5~1,0.25~0.5,<0.25 mm 粒径的团聚体。

>0.25 mm 土壤团聚体质量百分含量($\text{WSA}_{>0.25},\%$)计算公式为:

$$\text{WSA}_{>0.25}=\frac{M_{>0.25}}{M_a}=1-\frac{M_{<0.25}}{M_a}$$

式中: $M_{>0.25}$ 为>0.25 mm 土壤团聚体的质量(g);

$M_{<0.25}$ 为>0.25 mm 土壤团聚体的质量(g); M_a 为团聚体样品总质量(g)。

平均重量直径(MWD,mm)计算公式为:

$$\text{MWD}=\sum W_i X_i=\frac{\sum_{i=1}^n(\overline{X}_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

平均几何直径(GMD,mm)计算公式为:

$$\text{GMD}=\exp(\frac{\sum W_i \ln X_i}{\sum W_i})$$

式中: X_i 为各粒级团聚体的平均粒径(mm); W_i 为土壤不同粒径团聚体含量占各粒径团聚体之和的比例; $\ln X_i$ 为各粒级团聚体平均粒径的自然对数。

分形维数 PD 的计算采用的推导公式为:

$$\frac{M(r<\overline{X}_i)}{M_a}=(\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}})^{3-PD}$$

式中: X_i 为某级团聚体平均直径(mm); $M(r<X_i)$ 为粒径小于 X_i 的团聚体的质量(g); M_a 为团聚体样品总质量(g); $X_{\max}$ 为团聚体的最大粒径(mm)。

用环刀法测定土壤容重、孔隙度和田间持水量。计算公式分别为:

$$\text{土壤容重 } D=M_{\text{干}}/V_2$$

$$\text{孔隙度 } S=1-(D/\text{比重})$$

$$\text{田间持水量 } W=(M_{\text{湿}}-M_{\text{干}})/M_{\text{干}}$$

式中: D 为土壤容重(g/cm^3); $M_{\text{干}}$ 为烘干土重(g); V_2 为环刀容积(cm^3); W 为田间持水量(%); $M_{\text{湿}}$ 为吸水土重(g),相对密度为 2.65 g/cm^3 。

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2019 软件对数据进行基本处理,根据公式计算得出径流量和产沙量,再用 SPSS 26.0 和 Origin 2018 软件对氮投入量、降雨量、径流量、产沙量、土壤物理性质进行显著相关性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 2019—2020 年的降雨特征

由表 2 可知,2019 年和 2020 年试验区青贮玉米生育期(5—9 月)的总降雨量分别为 580.80,635.2 mm。依据中国气象局颁布的降雨强度等级划分标准可知,2019 年大田生育期降雨量主要集中于 6,7,9 月,3 个月占大田生育期降雨量比例为 79.41%,整个生育期内降雨共 64 次,其中低强度降雨、中强度降雨和高强度降雨频率分别为 44,12,8 次,没有极高强度降雨产生;而 2020 年大田玉米生育期降雨量主要集中于 7—9 月,占大田生育期降雨量比例为 79.68%,整个生育期内降雨共 80 次,其中低强度降雨 56 次,中强度降雨 11 次,高强度降雨 4 次,极高强度降雨 4 次,主要分布在 8 月。可见,2019 年和 2020 年的降雨以低强度降雨为主。

表 2 2019—2020 年玉米生育期内降雨特征

年份	月份	降雨量/ mm	低强度降雨		中强度降雨		高强度降雨		极高强度降雨	
			频率/次	降雨量/mm	频率/次	降雨量/mm	频率/次	降雨量/mm	频率/次	降雨量/mm
2019	5	44.20	4	10.60	2	33.60	0	0	0	0
	6	137.60	7	15.00	1	17.40	3	95.20	0	0
	7	209.80	14	53.00	2	34.40	4	124.00	0	0
	8	72.60	9	26.00	3	46.60	0	0	0	0
	9	116.60	10	18.80	4	67.20	1	30.60	0	0
	合计	580.80	44	123.40	12	199.20	8	248.20	0	0
2020	5	13.20	6	13.30	0	0	0	0	0	0
	6	61.00	7	19.60	1	10.40	1	31.00	0	0
	7	152.20	12	41.00	3	52.00	2	59.20	0	0
	8	274.40	16	27.00	3	54.20	1	26.80	3	166.40
	9	134.40	15	27.80	4	50.80	0	0	1	55.80
	合计	635.20	56	115.40	11	167.40	4	117.00	4	222.20

2.2 坡耕地 2019—2020 年的径流量及产沙量分析

由图 1 可知,2019 年试验观测期间测定径流 21 次,径流量主要产生在玉米生长前期(出苗—拔节期),随着玉米植株的长大,产流次数以及径流量逐渐减少。在青贮玉米整个生育期内,N3 处理的径流量

高于 N1 和 N2 处理。2020 年试验观测期间测定径流 16 次,径流量分布在玉米生长的每个时期阶段,但大径流量主要发生在玉米生长中后期(抽雄期—乳熟期),玉米整个生育期的处理 N3 和 N4 的径流量明显高于 N1 和 N2 处理。

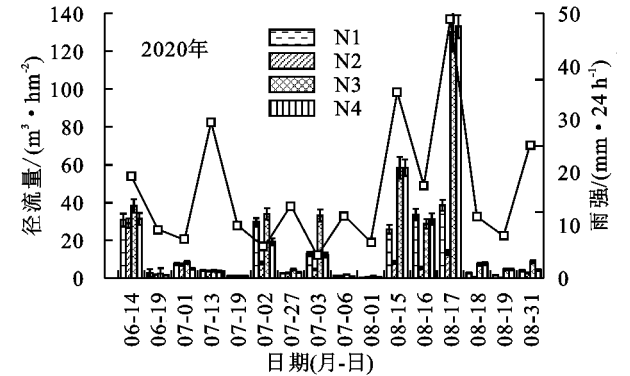
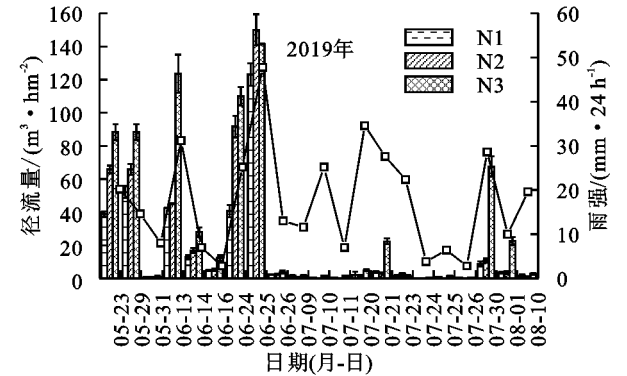


图 1 坡耕地 2019—2020 年的产流特征

由图 2 可知,2019 年产沙量的变化规律与径流量一致,试验观测期间共测定产沙量 19 次,泥沙量主要产生在玉米生长前期(出苗—拔节期),随着玉米植株的长大,产沙量逐渐减少,表现的规律为 N1<N2<N3,N3 处理的产沙量高于 N1 和 N2 处理。此外,2020 年试验观测期间测定泥沙量 15 次,与 2020

年的产流特点表现相一致,在玉米的各个生长阶段都有泥沙量的产生,而大产沙量主要发生在玉米生长中后期(抽雄期—乳熟期),产沙量大小随着降雨强度的变化而变化,雨强是影响 2020 年泥沙产生的主要因素,玉米整个生育期的处理 N3 和 N4 的产沙量高于 N1 和 N2 处理。

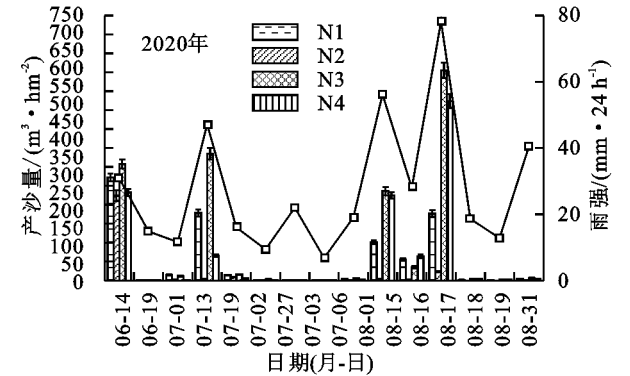
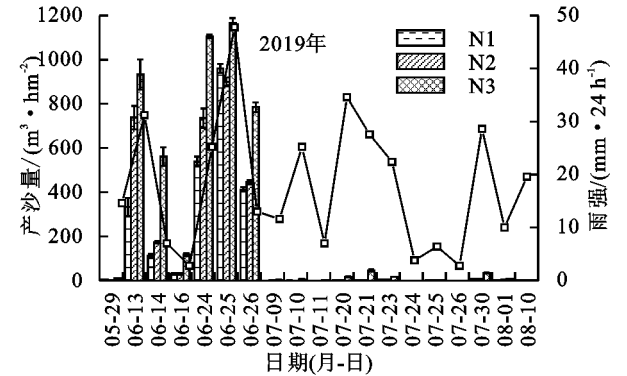


图 2 坡耕地 2019—2020 年的产沙特征

2.3 不同降雨强度下氮投入对地表径流量及产沙量的影响

由表 3 可知,2019 年,在低强度降雨和高强度降雨下,N1 和 N2 处理的径流量显著低于 N3 处理径流量($P<0.05$),比 N3 处理分别减少 53.61%和 53.17%,但二者的径流量差异不显著($P>0.05$);中强度降雨下,N3 处理的径流量极显著大于 N1 和 N2 处理($P<0.01$),N2 处理的径流量显著大于 N1 处理($P<$

0.05)。2020 年,N1、N2、N3 和 N4 处理的地表径流量在低、中和高强度降雨下均表现一致的变化规律,即 N3 和 N4 处理的地表径流量极显著大于 N1 和 N2 处理($P<0.01$),但 N1 和 N2 处理的地表径流量的差异不显著($P>0.05$),N3 和 N4 处理地表径流量的差异也不显著($P>0.05$),且 N1 和 N2 处理的径流量约为 N3 和 N4 处理的 50%;但在极高强度降雨下,各处理间的径流量差异不显著($P>0.05$)。

表 3 2019—2020 年不同降雨强度下径流量变化 单位:m³/hm²

年份	处理	低强度降雨	中强度降雨	高强度降雨	极高强度降雨
2019	N1	3.14±0.34bA	8.71±0.40cB	38.56±0.5bA	
	N2	3.17±0.27bA	12.32±0.97bB	43.16±1.18bA	
	N3	6.77±0.71aA	24.96±0.79aA	67.34±2.71aA	
	P	0.02	<0.01	0.03	
2020	N1	0.20±0.06cB	2.92±0.38bB	13.05±1.16bB	98.79±4.85aA
	N2	0.55±0.39cB	2.48±0.31bB	14.10±1.18bB	105.01±4.02aA
	N3	4.10±0.06aA	5.99±0.22aA	34.61±2.71aA	116.50±22.22aA
	N4	3.30±0.10bA	5.47±0.43aA	30.13±0.20aA	100.79±5.02aA
	P	0.01	<0.01	<0.01	0.75

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。下同。

由表 4 可知,2019 年,各处理间产沙量在不同降雨条件达到极显著差异($P<0.01$),整体表现为 N1 和 N2 处理的产沙量极显著低于 N3 处理($P<0.01$),但 N1 和 N2 间未达到显著差异($P>0.05$)。具体表现为:低强度降雨条件下,N1 和 N2 比 N3 分别拦截了 76.78%和 77.37%的产沙量;中强度降雨时 N1 和 N2 的产沙量分别为N3 的 37.39%和 39.99%。高强度降雨时 N1 和 N2 的产沙量分别为 N3 的 29.31%和 71.75%。对于

2020 年,低强度降雨时,N1 和 N2 的产沙量显著低于 N3 和 N4 的产沙量($P<0.05$),其产沙量大小依次为 N3>N4>N2>N1。在中、高强度降雨条件下,4 个处理间产沙量达到了极显著水平($P<0.01$),N3 和 N4 的产沙量极显著大于 N1 和 N2($P<0.01$),而 N1 和 N2 的产沙量差异不显著($P>0.05$),其中,N1 和 N2 比 N3 和 N4 约拦截了 50%的产沙量;但在极高强度降雨条件下,各处理产沙量的差异性不显著($P>0.05$)。

表 4 2019—2020 年不同降雨强度下产沙量 单位:kg/hm²

年份	处理	低强度降雨	中强度降雨	高强度降雨	极高强度降雨
2019	N1	1.57±0.03bB	70.54±27.93bB	111.70±3.25bB	
	N2	1.53±0.06bB	75.45±21.32bB	273.42±48.86bB	
	N3	6.76±0.61aA	188.63±36.16aA	381.04±66.32bB	
	P	<0.01	<0.01	<0.01	
2020	N1	0.79±0.34bA	5.67±0.29bBC	79.50±9.09cC	296.05±13.91bB
	N2	0.97±0.19bA	4.49±0.24bC	102.05±1.73dD	307.23±20.21bB
	N3	2.70±0.59aA	9.22±0.77aA	157.36±5.89aA	364.39±47.17aA
	N4	1.45±0.29aA	8.29±0.57aAB	120.47±2.18bB	396.11±59.74aA
	P	0.05	<0.01	<0.01	0.08

2.4 氮投入对侵蚀土壤水稳性团聚体的影响

由表 5 可知,2019 年,4 个处理的 WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 大小依次为 N2>N1>N3,但其差异性均未达到显著差异($P<0.05$)。反之,3 个处理间土壤团聚体的 PD 大小依次为 N2<N1<N3。2020 年,各处理间的 WSA_{>0.25} 含量和 MWD 大小依次均为 N2>N1>N3>N4,但均未达到显著差异($P>$

0.05);对于土壤团聚体的 GMD,N2 处理的 GMD 为 0.93,极显著高于其他处理($P<0.01$),其大小依次为 N2>N1>N4>N3。相反,对于 PD,处理 N2 处理的 PD 最小(2.05),但 4 个处理的 PD 差异不显著($P>0.05$)。

2.5 氮投入对侵蚀土壤的容重和孔隙度的影响

由表 6 可知,2019 年,收获玉米后 N1 和 N2 的

土壤容重显著小于 N3 处理($P<0.05$);反之,土壤孔隙度显著高于 N3 处理($P<0.05$);各处理的田间持水量大小为 $N1>N2>N3$,但各处理间未达到显著差异($P>0.05$)。2020 年,各处理间的变化规律与 2019 年相似,N4 处理的土壤容重最大,极显著大于 N1 和 N2 的土壤容重($P<0.01$),却与 N3 的土壤容

重差异不显著($P>0.05$);反之,N1 土壤孔隙度极显著大于 N3($P<0.01$),显著大于 N4 处理($P<0.05$),却与 N2 的土壤孔隙度差异性不显著($P>0.05$);同理,N1 的田间持水量最大,显著大于 N3 和 N4 处理($P<0.05$),但与 N2 的田间持水量未达到显著差异($P>0.05$)。

表 5 氮投入对土壤团聚体稳定性的影响

年份	处理	WSA _{>0.25}	MWD	GMD	PD
2019	N1	0.82±0.00aA	0.89±0.00aA	0.68±0.00aA	2.32±0.01aA
	N2	0.86±0.01aA	1.04±0.10aA	0.87±0.00aA	2.14±0.05aA
	N3	0.78±0.03aA	0.84±.032aA	0.60±0.01aA	2.43±0.12aA
	P	0.11	0.20	0.08	0.16
2020	N1	0.87±0.00aA	0.92±0.00aA	0.72±0.00bB	2.12±0.01aA
	N2	0.93±0.01aA	1.07±0.10aA	0.93±0.00aA	2.05±0.05aA
	N3	0.80±0.03aA	0.85±0.03aA	0.62±0.01cC	2.44±0.12aA
	N4	0.77±0.03aA	0.83±0.02bA	0.63±0.01cC	2.45±0.15aA
	P	0.11	0.15	0.01	0.10

表 6 土壤容重、孔隙度和田间持水量的变化

年份	处理	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 孔隙度	田间 持水量
2019	N1	1.16±0.40bA	0.56±0.01aA	48.58±2.142aA
	N2	1.18±0.10bA	0.55±0.00bA	46.74±1.52aA
	N3	1.20±0.02aA	0.54±0.01bA	46.36±1.38aA
	P	0.05	0.05	0.20
2020	N1	1.12±0.02cB	0.57±0.00aA	51.33±1.11aA
	N2	1.15±0.04bcAB	0.56±0.00abAB	48.86±2.28abA
	N3	1.18±0.03abAB	0.55±0.00bcAB	45.92±0.75bA
	N4	1.22±0.02aA	0.53±0.01cB	45.90±0.80bA
	P	<0.01	<0.01	0.02

2.6 相关性分析

通过对不同的氮投入量、坡耕地的径流量和产沙量三者的相关性分析发现,氮投入量与径流量和产沙

量存在显著负相关性,而产沙量与径流量呈极显著正相关关系(表 7)。

表 7 氮投入量与土壤侵蚀的相关性分析

因素	氮投入量	径流量	产沙量
氮投入量	1.00		
径流量	-0.80*	1.00	
产沙量	-0.73*	0.98**	1.00

注:*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。下同。

由表 8 可知,WSA_{>0.25}、MWD、GMD、PD、径流量和产沙量之间存在极显著的相关关系。WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 三者之间相互存在极显著正相关性;而 PD、径流量和产沙量与 WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 均呈现出极显著负相关关系。此外,径流量和产沙量与 PD 均存在极显著正相关性。

表 8 土壤水稳性团聚体结构与土壤侵蚀的相关性分析

因素	WSA _{>0.25}	MWD	GMD	PD	径流量	产沙量
WSA _{>0.25}	1.00					
MWD	0.96**	1.00				
GMD	0.93**	0.99**	1.00			
PD	-0.95**	-0.89**	-0.88**	1.00		
径流量	-0.95**	-0.93**	-0.92**	0.99**	1.00	
产沙量	-0.91**	-0.86**	-0.85**	0.93**	0.94**	1.00

将土壤容重、土壤孔隙度、田间持水量、径流量和产沙量数据进行相关性分析(表 9)发现,土壤孔隙度和田间持水量与土壤容重存在极显著负相关性,而田间持水量与孔隙度存在极显著正相关关系;径流量与土壤容重存在极显著正相关性,与土壤孔隙度和田间持水量存在显著负相关性;同理,产沙量与土壤孔隙度和田间持水量存在显著负相关性,与土壤容重呈显著正相关性关系。

表 9 土壤物理结构与土壤侵蚀的相关性分析

因素	土壤容重	土壤孔隙度	田间持水量	径流量	产沙量
土壤容重	1.00				
土壤孔隙度	-1.00**	1.00			
田间持水量	-0.90**	0.90**	1.00		
径流量	0.82**	-0.82*	-0.71*	1.00	
产沙量	0.76*	-0.76*	-0.75*	0.98**	1.00

3 讨论

3.1 氮投入和降雨强度对土壤侵蚀的影响

作物覆盖是控制土壤侵蚀的主要措施,而氮投入是调控作物(玉米)生长发育的关键因子,因此,坡耕地的土壤侵蚀会随着玉米氮肥投入的差异而发生一系列变化。本研究表明,N1 和 N2 处理的径流量和产沙量均显著小于 N3 和 N4 处理的径流量和产沙量($P<0.05$),部分原因为适量氮肥投入的玉米株高和叶面积均显著高于过量减氮处理($P<0.05$)^[15],从而可增加地表的覆盖。其次,作物覆盖度是影响径流发生时间、及产流产沙量的主要因素,作物覆盖大延迟产流的时间,并且还具有减流减沙效应^[16]。此外,玉米的不同冠层覆盖度能改变穿透雨量和茎秆流的比例,高覆盖度的冠层布局能削弱降雨对地表的冲刷和击溅,增强土壤对降雨的入参与截留能力^[17]。从整体来看,适量的氮投入还会促进玉米根系的生长,从而增强土壤的抗剪切力和抗冲性,进一步提高土壤的抗蚀性。因此,后期研究应该结合玉米冠层分布和土壤理化性质来综合分析不同氮投入对坡耕地水土流失的影响。

2019 年较大的径流量和产沙量主要集中在青贮玉米生长前期(出苗—拔节期),随着玉米植株的长大,产流产沙量逐渐减少,表明地上部分的覆盖是影响坡耕地产流的主要因素,可能是因为地表覆盖削弱了雨滴的击溅,增强雨水下渗能力^[18],从而减少地表径流。而 2020 年的较大的径流量和产沙量主要集中在青贮玉米生长中后期(抽雄期—乳熟期),主要原因是高强度降雨和极高强度降雨集中在玉米生长中后期(表 2),说明降雨强度是影响径流量和产沙量大小的主要因素。

本研究发现,在极高强度降雨下,各处理间径流量及产沙量差异性不显著(表 3 和表 4),由此可知,随着降雨强度增大,氮投入对坡面土壤侵蚀的影响作用越小。可能是因为极高强度降雨使雨滴迅速汇集成水流,削弱作物叶片等覆盖对降雨的拦截能力,从而加剧坡耕地水土流失;另一方面,极高强度降雨的降雨速率远高于红色土坡面的土壤入渗速率,使地表容易超渗产流,同时容易使单个土粒离开土体发生迁移,进而加大产沙量,对坡面造成严重侵蚀^[19],此外,坡耕地被强烈的降雨冲刷后,加大土壤颗粒间的分散程度,降低土壤黏结力,导致土壤团聚体的稳定性下降,加剧了坡耕地水土流失,导致玉米植株冠层覆盖度随氮投入改变对坡面产流产沙的影响作用变小。

3.2 土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀的关系

一般情况下,WSA_{>0.25}、MWD、GMD 和 PD 是表征土壤团聚体稳定性的相关参数之一。土壤团聚体的稳定性对水土流失的积极影响可能是由于提高了>2 mm 水稳性土壤团聚体的含量及改善土壤饱和和导水率^[20]。本研究表明,N2 处理的 WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 比其他 3 个处理大,而 PD 却比较小(表 5),说明了 N2 处理土壤的团聚体平均粒径团聚度较高,土壤团聚体稳定性较强,一定程度上可以减缓坡耕地的水土流失情况^[21]。在雨滴撞击土壤的过程中,团聚体破裂并产生更细、更易运输的颗粒和微团聚体,这些颗粒和微团聚体对土壤入渗、结皮、产流和产沙过程有明显的影响^[22]。因此,团聚体稳定性是可以解释、量化和预测这些过程的重要属性。

土壤容重与坡耕地的水土流失互为影响。本研究表明,N1 和 N2 处理的土壤孔隙度显著大于 N3 和 N4 处理的土壤孔隙度($P<0.05$)(表 6),这主要由 N3 和 N4 处理的水土流失较 N1 处理和 N2 处理严重引起。不同程度的土壤侵蚀使表层腐殖质层或耕作层被剥离的情形不同,被严重侵蚀的土壤暴露了其心土层或母质层,还可能被击溅侵蚀后分散的细土粒填充土壤孔隙,从而增大土壤容重,降低土壤的下渗能力^[23],这与本研究的研究结果径流量和产沙量与土壤容重存在显著正相关性相一致(表 9)。

本研究还发现,径流量和产沙量与 WSA_{>0.25}、MWD 和 GMD 存在极显著负相关关系,而与 PD 呈极显著正相关性(表 8)。说明>0.25 mm 大团聚体的数量越多、MWD 和 GMD 越大,PD 越小,水稳性团聚体的稳定性越好。反之,土壤团聚体结构越不稳定,越容易被破坏,形成<0.25 mm 的小颗粒数量越多,MWD 和 GMD 降低,PD 反而增大,土壤团聚体的水稳定性变差^[24]。当然,土壤可以通过团聚体、有机碳和微生物群落三者之间密切联系来改变土壤的理化性质,从而提高土壤抗侵蚀性和肥力。因此,未来研究应将土壤团聚体的稳定性、有机碳和微生物群落相结合来探讨坡耕地土壤侵蚀和土地退化的机制。

4 结论

(1)坡耕地的径流量和产沙量与氮投入量存在显著负相关关系,4 个氮投入处理下的径流量和产沙量大小均表现为 N1<N2<N3<N4。

(2)不同氮投入处理下坡面产流产沙过程主要与降雨强度关系密切,在低强度、中强度和高强度降雨条件下,N1 和 N2 处理的径流量和产沙量均显著小于 N3 和 N4 处理($P<0.05$),但在极高强度降雨下,

各处理径流量和产沙量的差异均不显著($P>0.05$),说明在极高强度降雨下,氮投入对坡面土壤侵蚀的影响作用较小。

(3)N2 与 N1 处理径流量及产沙量差异均未达到显著水平($P>0.05$),同时,N2 处理的 $WSA_{>0.25}$ 、MWD 和 GMD 其他 3 个处理大,而 PD 却比较小,说明在当地施肥水平上减少 25%的氮投入量不会加重土壤侵蚀,还可以通过改善土壤团聚体结构稳定性。

参考文献:

[1] Nishigaki T, Sugihara S, Kilasara M, et al. Surface runoff generation and soil loss under different soil and rainfall properties in the Uluguru mountains tanzania[J].Land Degradation and Development, 2018,28(1):283-293.

[2] Yang D W. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes[J].Hydrological Processes,2010,17(14):2913-2928.

[3] Gerard G, Roel M, Bas V W, et al. Soil conservation in the 21st century: Why we need smart agricultural intensification[J].Soil, 2017,3(1):45-59.

[4] Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data[J].Geomorphology,2010,122(1):167-177.

[5] 姜敏.衡南县土壤肥力空间变异及对土壤侵蚀的响应[D].武汉:华中农业大学,2016.

[6] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology[J].European Journal of Soil Science, 2010,48(1):39-48.

[7] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等.不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].生态学报,2010,30(4):1035-1041.

[8] 柳开楼,黄晶,张会民,等.长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J].土壤学报,2018,55(2):443-454.

[9] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):274-281

[10] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):21-28.

[11] 王新霞,左婷,王肖君,等.稻-麦轮作条件下 2 种施肥

模式作物产量和农田氮磷径流流失比较[J].水土保持学报,2020,34(3):20-27.

[12] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等.长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究[J].土壤学报,2009,46(3):520-525.

[13] 唐柄哲.不同施肥类型及作方式下紫色土坡耕地径流氮、磷流失研究[D].重庆:西南大学,2016.

[14] 王莺.山核桃林地表径流养分流失动态及其与土壤养分关系的研究[D].杭州:浙江农林大学,2019.

[15] 郭萍,王子豪,刘斌祥,等.不同覆盖方式下减氮对玉米生长与氮素吸收、运转和分配的影响[J].中国土壤与肥料,2021(1):229-239.

[16] Lin Q T, Xu Q, Wu F Q, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities[J].Catena, 2019,183:1046-1053.

[17] 欧阳铨人,字淑慧,吴开贤,等.模拟雨条件下玉米马铃薯间作对降雨入渗量的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):14-21.

[18] 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.

[19] Chen X A, Liang Z W, Zhang Z Y, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in red soil slope farmland under natural rainfall[J].Sustainability, 2020,12(8):e3417.

[20] Agostini M, Studdert G A, San M S, et al. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea mays* L.) performance[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2012,12(2):271-282.

[21] 姜义亮,郑粉莉,王彬,等.东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响[J].生态学报,2013,33(24):7774-7781.

[22] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China[J].Soil and Tillage Research,2008,100(1/2):34-41.

[23] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J].Catena,2010,81:77-85.

[24] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):274-281,290.