

不同种植模式和坡度对片麻岩山坡地氮素流失的影响

张佳崎¹, 马悦¹, 张瑞芳^{2,3}, 张爱军^{2,3}, 周大迈^{2,3}, 王红^{2,3}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000;

2. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北保定 071001; 3. 河北省山区研究所, 河北保定 071000)

摘要: 通过室外人工模拟降雨的方法, 研究了在不同坡度(5°, 15°, 25°, 35°)与不同欧李种植模式(1, 2, 3行)下对片麻岩山坡地土壤坡面氮素流失和产流的影响。结果表明: (1) 产流时间随着坡度增大而提前, 平均产流时间从种植模式3行到1行推迟了59.23%, 2行到1行推迟了32.28%; 不同种植模式下产流强度及波动幅度均为1行>2行>3行; (2) 降雨过程中, 不同种植模式下氮素流失量和流失浓度表现为1行>2行>3行, 不同坡度下, 氮素流失量和流失浓度为5°<15°<25°>35°, 临界坡度为25°; (3) 相同坡度, 种植模式由2行到3行时硝态氮流失量减幅最大, 5°, 15°, 25°, 35°分别减少了16.78%, 44.71%, 41.33%, 41.89%; (4) 氮素流失过程中硝态氮流失量占比40.35%, 铵态氮流失量占比10.13%, 流失形式以硝态氮为主; (5) 相同种植模式, 2种氮素流失量和流失浓度与坡度存在二次函数关系, 相同坡度, 与种植模式存在线性关系, 相关系数(R^2)范围分别为0.531~0.999, 0.102~0.999; (6) 种植模式与硝态氮流失量和铵态氮流失量均呈线性负相关关系, 是影响氮素流失的主要因子。在片麻岩山坡地, 利用多行交错方式种植欧李可显著降低氮素流失。

关键词: 种植模式; 坡度; 氮素流失; 片麻岩

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0008-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.002

Effects of Different Vegetation Patterns and Slopes on Nitrogen Loss in Gneiss Hillside

ZHANG Jiaqi¹, MA Yue¹, ZHANG Ruifang^{2,3}, ZHANG Aijun^{2,3}, ZHOU Damai^{2,3}, WANG Hong^{2,3}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000;

2. National North Engineering Technology Research Center for Agricultural in Northern Mountainous Areas,

Baoding, Hebei 071001; 3. Hebei Mountain Research Institute, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Through the method of outdoor artificial rainfall simulation, the effects of different slopes (5°, 15°, 25° and 35°) and different planting patterns of *Prunus humilis* (one row, two rows and three rows) on nitrogen loss and runoff production in gneiss hillsides were studied. The results showed that: (1) The runoff yield time was advanced with the increasing of the slope gradient, and the average runoff yield time was delayed by 59.23% from three rows planting to one row planting, and it was delayed by 32.28% from two rows planting to one row plant, and the runoff yield intensity and fluctuation range of the different planting patterns followed the order of one row > two rows > three rows. (2) During the rainfall process, the nitrogen loss and the loss concentration of different planting patterns were sequenced as one row > two rows > three rows. Under the different slopes, the nitrogen loss and the loss concentration were sequenced as 5° < 15° < 25° > 35°, and the critical slope gradient was 25°. (3) On the same slope, the loss of nitrate nitrogen was the largest when the planting pattern was two rows to three rows, which decreased by 16.78%, 44.71%, 41.33% and 41.89%, respectively. (4) During the nitrogen loss process, nitrate nitrogen loss accounted for 40.35%, ammonium nitrogen loss accounted for 10.13%, and nitrate nitrogen was the main form of loss. (5) In the same planting pattern, there was a quadratic function between the loss amount and the loss concentration of the nitrogen and the slope, the correlation coefficients (R^2) ranged from 0.531 to 0.999. On the same slope, the loss amount and the loss concentration of the nitrogen had linear relationship

收稿日期: 2019-01-10

资助项目: 河北省自然科学基金项目(C2015204155)

第一作者: 张佳崎(1992—), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 402943519@qq.com

通信作者: 王红(1976—), 女, 河北定州人, 硕士生导师, 研究员, 主要从事退化山地治理与生态重建研究。E-mail: wanghong@hebau.edu.cn

with the planting pattern, and the correlation coefficients (R^2) ranged from 0.102 to 0.999. (6) Planting pattern was negatively correlated with nitrate nitrogen loss and ammonium nitrogen loss, which was the main factor affecting nitrogen loss. In the gneiss hillsides, planting *P. humilis* in multi-row staggered way could significantly reduce nitrogen loss.

Keywords: planting pattern; slope; nitrogen loss; gneiss

氮是植物进行正常生命活动的重要元素,也是一个重要的污染源,土壤坡面上的氮素流失进入水体,会引起水体的富营养化^[1],造成水体的污染,氮素的流失会引起土壤氮素的缺乏,导致土壤生产力的下降,最终导致化肥的使用量加大。坡面氮素流失的主要载体就是坡面的地表径流及其携带的泥沙^[2],流失过程包括2个:一是随着径流的横向迁移;二是因淋溶造成的纵向迁移。影响坡面径流的因素有很多,主要有降雨强度、坡面坡度、土壤理化性质、种植模式等^[3]。坡度直接影响雨滴溅蚀土壤的角度和坡面承受的雨量,有研究^[4]指出有“临界坡度”的存在。河北省太行山区坡耕地多、范围广,成土母质以片麻岩为主,营养元素匮乏,土壤结构松散,易发生水土流失^[5],本研究通过人工降雨试验,分析了不同坡度和种植模式下氮素流失过程,探讨种植模式和坡度下氮素流失的规律,为河北省山区水土流失治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验供试土壤采集于河北省唐县山坡地,成土母质为片麻岩(坐标为东经 $114^{\circ}28'$ — $115^{\circ}03'$,北纬 $38^{\circ}38'$ — $39^{\circ}10'$),土壤类型为褐土(0—20 cm)。土壤质地为沙土和沙壤土,土壤机械组成及团粒结构较差^[6]。唐县的气候类型为暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.2°C ,最高气温 41.4°C ,最低气温 -14.5°C ,无霜期为195天,年均降水量539.2 mm^[7]。分为0—20,20—50 cm两层按顺序填入可调坡度的试验钢槽车,试验为了最大限度地接近自然坡面土壤状况,不进行过筛处理,将土进行1年的自然压实处理。供试土壤(0—20 cm)含水量1.77%,容重 1.85 g/cm^3 ,全氮 1.26 g/kg ,全磷 0.45 g/kg ,全钾 25.47 g/kg ,速效磷 7.08 mg/kg ,速效钾 92.64 mg/kg 。供试植被为水土保持植物3年生欧李。

1.2 试验设计

试验于2016年4月10日在国家北方山区农业工程技术研究中心降雨大厅进行,模拟降雨设备为喷射型仿真降雨设备(QYJY—503),降雨高度约为10 m,有效降雨面积约 70 m^2 。河北省内太行山区年降水分布不均,降雨相对集中在7—8月,降雨强度巨大(一般为暴雨到大暴雨)且历时较短^[8],根据太行山片麻岩山区自然降雨强度,设置降雨强度为 80 mm/h ,

降雨均匀度在90%以上。植物篱种植模式是一种坡地保护性耕作和持续利用技术,故本试验采用植物篱种植模式^[9],并由此推断植被行数越多,固持土壤能力越强。试验共设置3个种植模式处理(1行欧李,2行欧李,3行欧李)和4个坡度处理(5° , 15° , 25° , 35°),共12个处理,3次重复,共36个种植小区。试验槽尺寸为 $1.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$,坡度调节范围在 $0\sim 40^{\circ}$,为了防止各小区产生相互影响以及雨滴溅蚀造成误差,在每个钢槽两侧加上高出土面10 cm的木板。每个钢槽末端连接固定“V”形铁槽,用来收集径流。

1.3 试验方法

试验在土壤解冻后进行,每个钢槽内每隔50 cm分别以移栽的方式种植1,2,3行欧李,每行相互交错种植2株,形成植物篱拦截,各个钢槽内植被均保持山区自然生长状态。估测并修剪植被覆盖度在一致的情况下,共进行2场有效降雨,每场降雨100 min,降雨开始记录各小区产流时间,第1场降雨用塑料桶每5 min收集1次径流,用以测定径流量;第2场降雨每个钢槽放置1个塑料桶用以收集径流,结束后测定径流中养分含量。径流中全氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法^[10]测定,硝态氮和铵态氮使用流动分析仪测定;本研究中引入指标坡面入渗率 f ,计算公式^[11]为:

$$f = (I_t \cos \theta - 10R/S) / t$$

式中: I_t 为降雨强度(mm/min); t 为降雨时间(min); θ 为坡面坡度($^{\circ}$); R 为 t 时间产流量(mL); S 为坡面面积(cm^2)。

2 结果与分析

2.1 种植模式和坡度对产流过程的影响

由图1可知,随着坡度的增大,初始产流时间提前,这一方面因为坡度增大,径流入渗率降低(图2),更有利于径流的汇集和产生;另一方面,坡度的增大导致了沿坡面方向径流速度增大,从而产流时间提前。在不同种植模式下,随着种植行数的增加,初始产流时间推迟,产流时间从种植模式3行到1行推迟了59.23%,2行到1行推迟了32.28%,这首先一方面因为雨滴溅蚀的角度和坡面的势能影响等综合因素的影响^[12];另一方面因为植物行数增加增大了植被覆盖度,对雨滴的拦截作用增强,从源头上减少径流的形成;其次,植物种植行数的增加减缓了径流速

度,让更多的地表径流渗入土壤,成为壤中流^[13];最后,植物的根系可能改变了土壤的物理性质,加强了对土壤的固持能力,增强了土壤保水能力。

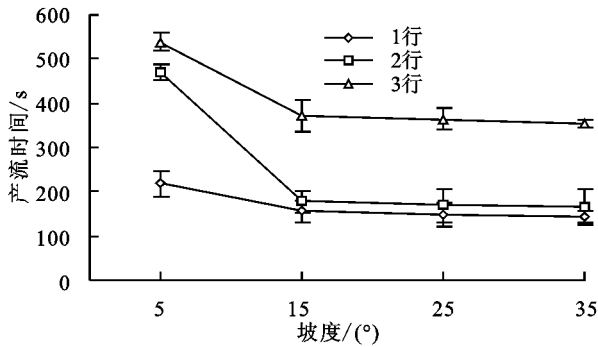


图 1 不同种植模式和坡度下产流时间的变化

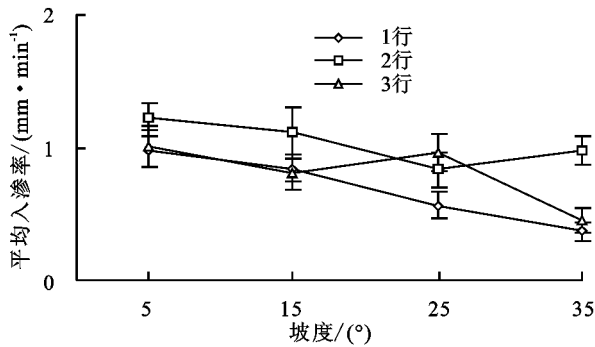


图 2 不同种植模式和坡度下平均入渗率的变化

本文选取了 25° 的试验槽在 3 种植模式下产流量与随时间变化的数据(图 3)。由图 3 可知,不同种植模式产流强度随着降雨时间变化呈现出先增大后减小最后趋平稳的趋势,并且产流强度大小及稳定性均为 1 行 > 2 行 > 3 行,种植模式为 1 行的产流强度变化范围为 310~730 mL/min,极差为 420 mL/min,2 行种植模式下产流强度范围为 126.67~378 mL/min,极差为 251.33 mL/min,3 行种植模式下产流强度范围 143.33~226.67 mL/min,极差为 83.33 mL/min,极差分别减少了 40.16%,80.16%,这主要是因为种植行数的增加,交错式种植方式阻碍径流作用加强,从而减小径流速度,增大了径流流动时间,另一方面增强了径流向土壤的渗入作用^[14]。

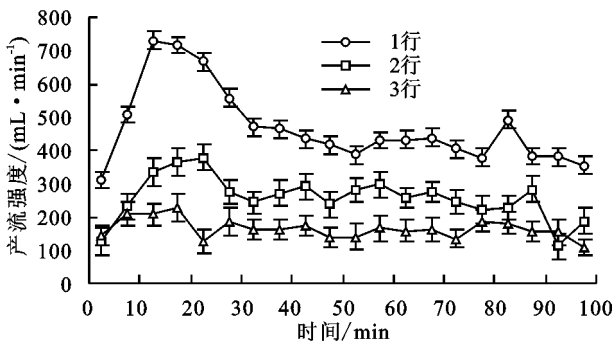


图 3 25° 坡度下不同种植模式与产流强度的变化

2.2 种植模式和坡度对氮素流失的影响

2.2.1 种植模式对氮素流失的影响 氮素的流失形

态可分为硝态氮的流失和铵态氮的流失^[15]。由图 4 可知,硝态氮流失量和流失浓度随种植模式均呈现出 1 行 > 2 行 > 3 行的变化,在相同坡度下,种植模式为 1 行到 2 行硝态氮的流失量分别减少了 19.30%,15.56%,5.01%,15.08%;2 行到 3 行种植模式硝态氮流失量分别减少了 16.78%,44.71%,41.33%,41.89%;增加种植行数可以减少硝态氮流失量和流失浓度,尤其是在 2 行增加 3 行时,硝态氮流失量减少幅度最大,减少幅度约为其他行数的 2~4 倍。可以看出,在不同种植模式下,硝态氮流失浓度的变化差异不显著,并且随着种植行数的增加而降低。当坡度由 5° 到 35° 过程中,种植模式为 1 行时,硝态氮流失浓度变化量范围为 4.80~7.78 mg/L,极差为 2.98 mg/L,2 行时浓度变化为 3.91~6.92 mg/L,极差为 3.01 mg/L,3 行时为 2.60~4.45 mg/L,极差为 1.85。

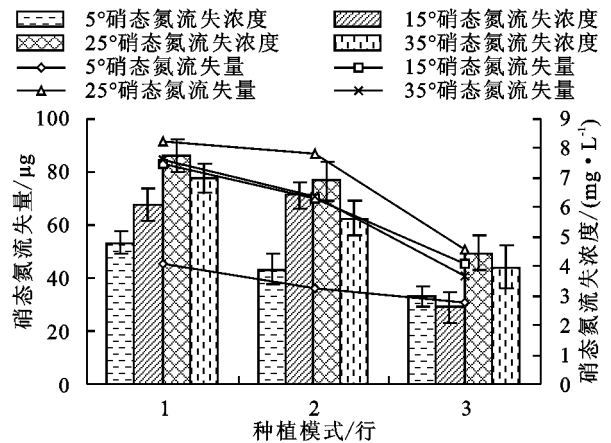


图 4 硝态氮流失量和流失浓度与种植模式和坡度的变化

由图 5 可知,铵态氮流失量和流失浓度均随着种植行数的增加呈下降趋势,坡度为 5° 时,种植模式由 1 行到 2 行,铵态氮流失浓度由 1.84 mg/L 减少到 1.73 mg/L,减少了 5.98%,2 行到 3 行,由 1.73 mg/L 减少到 1.28 mg/L,减少了 26.01%;15° 时,分别减少了 10.99%,10.00%,25° 时,分别减少了 9.22%,16.58%;35° 时,减少了 17.83%,14.47%,铵态氮流失浓度基本稳定,流失量范围维持在 7.54~21.43 μg,极差为 13.89。

造成 2 种氮流失量和流失浓度发生这种变化一方面因为种植行数的增加,增加了植物的种植密度,进而增大了植被的覆盖度,植被覆盖度是土壤侵蚀的重要因素,它的增加可以拦截雨滴,降低雨滴溅蚀土壤的动能,植被的增加也可以改善土壤表层的物理和化学性质,可以增加土壤黏粒和土壤团聚体数量^[16]。植被的增加增大了植物在土壤中的根系密度,植物的根系可以有效固定植物所需要的营养元素,减少径流中 2 种氮素含量,植被的增加,也加强了硝态氮和铵态氮的吸收利用,此外,欧李的根状茎在一定程度上

也会对径流起到截流作用^[17],植株越多,阻拦作用越大,因此减少了径流量和径流速度,削弱了径流对土壤的侵蚀作用,最终导致了流失量和流失浓度的变化。另外,15°时,种植模式为1行增加到2行,硝态氮流失浓度升高,这可能是由于植物行数的增加延长了径流的滞留时间^[18],土壤中硝态氮进入径流当中,导致了浓度的升高。

在一定坡度下,将种植模式与硝态氮和铵态氮流失量和流失浓度进行回归分析,结果列于表1、表2,可知种植模式与硝态氮和铵态氮的流失量和流失浓度存在着良好的线性关系。

表1 一定坡度下种植模式与硝态氮流失量和硝态氮流失浓度回归分析

坡度/(°)	流失量		流失浓度	
	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
5	$y_1 = -7.095x_1 + 51.660$	0.983	$y_2 = -0.910x_1 + 5.717$	0.999
15	$y_1 = -18.845x_1 + 103.272$	0.968	$y_2 = -1.750x_1 + 8.540$	0.682
25	$y_1 = -20.300x_1 + 117.233$	0.834	$y_2 = -1.665x_1 + 9.713$	0.928
35	$y_1 = -21.845x_1 + 108.993$	0.961	$y_2 = -1.520x_1 + 8.580$	0.998

注: x_1 为种植模式(行); y_1 为硝态氮流失量(μg); y_2 为硝态氮流失浓度(mg/L)。

表2 一定坡度下种植模式与铵态氮流失量和铵态氮流失浓度回归分析

坡度/(°)	流失量		流失浓度	
	拟合方程	R ²	拟合方程	R ²
5	$y_3 = -4.515x_1 + 21.670$	0.952	$y_4 = -0.280x_1 + 2.177$	0.891
15	$y_3 = -3.010x_1 + 23.277$	0.972	$y_4 = -0.190x_1 + 2.093$	0.996
25	$y_3 = -2.860x_1 + 24.767$	0.923	$y_4 = -0.250x_1 + 2.330$	0.981
35	$y_3 = -0.600x_1 + 14.770$	0.102	$y_4 = -0.275x_1 + 2.107$	0.987

注: x_1 为种植模式(行); y_3 为铵态氮流失量(μg); y_4 为铵态氮流失浓度(mg/L)。

2.2.2 坡度对氮素流失的影响 由图6可知,种植模式相同条件下,随着坡度的增大,硝态氮的流失量和流失浓度呈先增大后减小的趋势,坡度为25°时,硝态氮流失量和流失浓度均达到峰值,流失量分别为97.80, 80.10, 51.10 μg , 流失浓度分别为7.78, 6.92, 4.45 mg/L 。铵态氮流失量和流失浓度与硝态氮流失量和流失浓度变化趋势基本一致(图7),铵态氮流失浓度基本保持不变,维持在1~2 mg/L ,这主要是因为铵态氮带正电荷,可以与土壤发生吸附作用^[19],几乎不会发生淋溶而损失掉,2类氮素形式从5°到15°流失量急剧增大,从15°到25°增加量趋于平缓,一方面由于随着坡度的抬升,雨滴的溅蚀和径流的冲刷使松散的土壤颗粒随流而下,导致了2种氮素态氮的流失量和硝态氮流失浓度急剧增大;另一方面随着地表径流逐渐趋于稳定,形成了一层水膜,减少了雨滴对坡面的打击作用,减小了雨滴对坡面的剪切力^[20],从而2种氮流失量减缓并趋于稳定。2种氮素流失量和流失浓度均在25°之后开始下降,这主要是因为临界坡度的存在,这与黄丽等^[21]根据三峡库区紫色土养分流失试验,发现当坡度由20°增至35°时,土壤和养分的流失量却逐渐下降,指出紫色土坡地的侵蚀临界坡度约

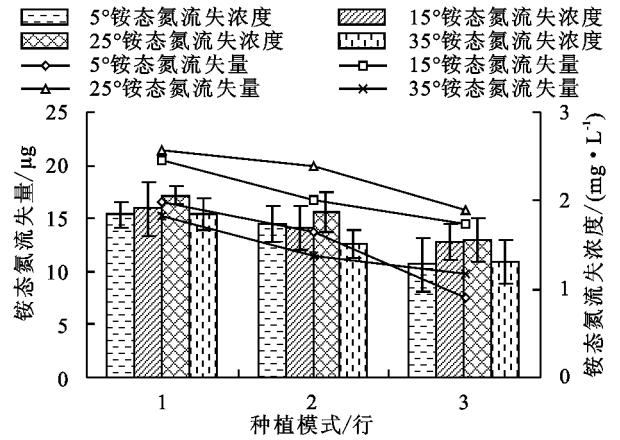


图5 铵态氮流失量和流失浓度与种植模式和坡度的变化

在20°~35°研究结论一致,在临界坡度之前,坡度越大,雨水和径流对土壤的冲刷也越大,当超过临界坡度后,径流和雨滴对坡面的冲刷打击逐渐减弱,氮素的流失逐渐减弱^[22]。

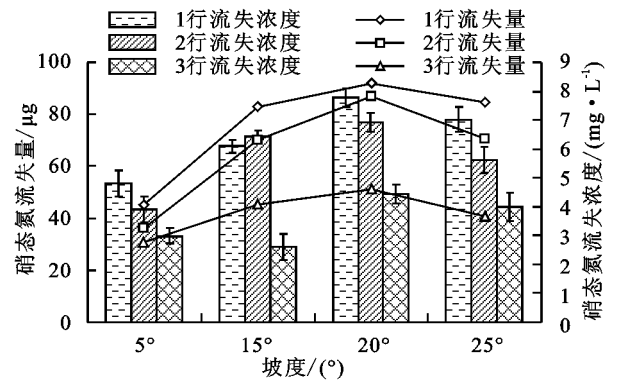


图6 硝态氮流失量和流失浓度与种植模式和坡度的变化

将2种氮素流失量和流失浓度在一定种植模式下进行线性回归分析。由表3、表4可知,2行植被模式下,硝态氮流失浓度与坡度存在良好的二次函数关系,流失浓度与坡度决定系数较高的是在1行种植模式条件下, R^2 为0.997,种植模式为3行时,坡度与流失浓度拟合效果较差, R^2 仅为0.531。铵态氮流失量与坡度有较强的二次项关系,且拟合效果较

好,但是铵态氮流失浓度与坡度的二次函数关系较弱,拟合效果较差,只有在种植模式为 3 行情况下,与坡度拟合度较好。

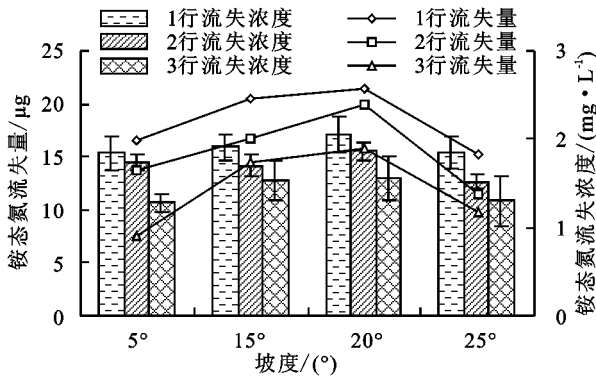


图 7 铵态氮流失量和流失浓度与种植模式和坡度的变化

表 3 一定种植模式下坡度与硝态氮流失量和流失浓度回归分析

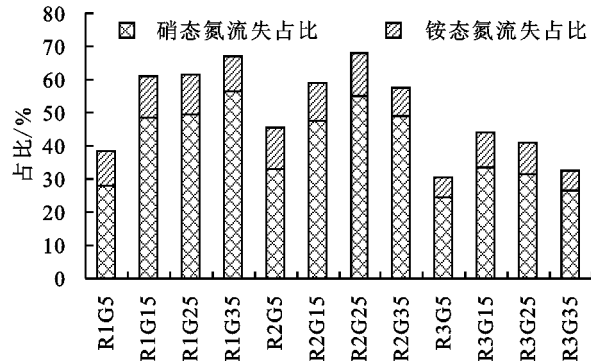
种植模式	流失量		流失浓度	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
1	$y_1 = -0.112x_2^2 + 5.763x_2 + 19.746$	0.997	$y_2 = -0.005x_2^2 + 0.289x_2 + 3.340$	0.919
2	$y_1 = -0.126x_2^2 + 6.221x_2 + 7.574$	0.994	$y_2 = -0.100x_2^2 + 0.437x_2 + 1.972$	0.999
3	$y_1 = -0.061x_2^2 + 2.808x_2 + 18.018$	0.994	$y_2 = -0.001x_2^2 + 0.580x_2 + 2.471$	0.531

注: x_2 为坡度($^{\circ}$); y_1 为硝态氮流失量(μg); y_2 为硝态氮流失浓度(mg/L)。

表 4 一定种植模式下坡度与铵态氮流失量和流失浓度回归分析

种植模式	流失量		流失浓度	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
1	$y_3 = -0.26x_2^2 + 0.990x_2 + 12.062$	0.985	$y_4 = -0.001x_2^2 + 0.030x_2 + 1.687$	0.687
2	$y_3 = -0.28x_2^2 + 1.099x_2 + 8.408$	0.813	$y_4 = -0.001x_2^2 + 0.027x_2 + 1.577$	0.583
3	$y_3 = -0.22x_2^2 + 1.076x_2 + 2.849$	0.989	$y_4 = -0.001x_2^2 + 0.052x_2 + 1.049$	0.996

注: x_2 为坡度($^{\circ}$); y_3 为铵态氮流失量(μg); y_4 为铵态氮流失浓度(mg/L)。



注: R 为种植行数; G 为坡度。

图 8 氮素流失形态占比

2.4 种植模式和坡度与氮素流失的相关性分析

为明确氮素流失与种植模式和坡度的关系,将硝态氮和铵态氮的流失量与种植模式和坡度进行相关性分析。由表 5 可知,硝态氮流失量与种植模式的相关系数绝对值为 0.665,呈显著负相关关系($P < 0.05$),与坡度的相关系数为 0.663,呈显著正相关关系($P < 0.05$),说明种植模式对硝态氮的流失产生了明显拦截作用^[24],增加种植行数可以明显减少硝态氮的流失量,坡度对硝态氮的流失有明显的促进作用。铵态

2.3 铵态氮和硝态氮流失量对比分析

在氮素流失形式方面,结合图 4~图 7,可以看出硝态的流失量和流失浓度均高于铵态氮的流失量和流失浓度。由 2 种氮素流失量占全氮流失量的百分比(图 8)可知,硝态氮流失量平均占比为 40.35%,而铵态氮的流失量平均占比为 10.13%,无论在何种坡度和种植模式下,硝态氮的流失量占比均高于铵态氮的流失量占比,说明氮素流失过程中以硝态氮流失为主,这是由于铵态氮带正电,土壤胶体带负电,铵态氮可以与土壤发生吸附作用,从而加强土壤对铵态氮的固持能力,而硝态氮带负电,导致土壤胶体对硝态氮的吸附作用很小^[23],所以铵态氮流失量和流失浓度均较小,硝态氮更容易遭受到雨水冲刷而发生流失。

氮流失量与种植模式也呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数绝对值为 0.656,与坡度为正相关,相关系数为 0.016,说明种植模式对减少铵态氮流失有明显的推动作用,而坡度对铵态氮的流失并无影响。通过对比,得出种植模式是硝态氮流失和铵态氮流失的主要影响因子。

将种植模式(x_1)、坡度(x_2)与硝态氮流失量和铵态氮流失量进行多元线性回归分析,拟合结果为:

$$y_1 = -17.021x_1 + 0.942x_2 + 76.584 \quad R^2 = 0.682$$

$$y_2 = -3.260x_1 + 0.040x_2 + 21.723 \quad R^2 = 0.431$$

式中: x_1 为种植模式(行); x_2 为坡度($^{\circ}$); y_1 为硝态氮流失量(μg); y_2 为铵态氮流失量(μg)。

可以看出,硝态氮与种植模式和坡度的拟合度较高,可以较好地描述种植模式、坡度对硝态氮流失量的关系。

表 5 种植模式和坡度与氮素流失量的相关性分析

指标	硝态氮流失量	铵态氮流失量
种植模式	-0.665*	-0.656*
坡度	0.663*	0.016

注: * 表示 $P < 0.05$ 呈显著性水平。

3 结论

(1)初始产流时间随着坡度的增大而提前,随着种植行数的增加有不同程度的推迟。25°坡度下,产流强度随着降雨时间呈现出先增大后减小最后趋于平稳的趋势;种植行数增加,产流强度显著降低。

(2)降雨过程中,随着欧李种植行数的增加氮流失量和流失浓度显著降低,氮素流失量和流失浓度随着坡度的增加表现为先增大后降低,临界坡度为25°。

(3)在同一种植模式下,硝态氮、铵态氮流失量和流失浓度与坡度存在二次函数关系,同一坡度下,与种植模式存在的线性关系,决定系数范围分别为0.531~0.999,0.891~0.999。

(4)种植模式从1行到2行、2行到3行,硝态氮流失量、流失浓度和铵态氮流失量显著降低,且2行增加到3行降幅最大;铵态氮流失浓度随着坡度和种植模式的变化幅度较小,基本保持平稳;氮素流失以硝态氮为主。

(5)种植模式与硝态氮流失量和铵态氮流失量均呈显著负相关关系,与坡度呈显著正相关关系,坡度对铵态氮流失量无显著影响,种植模式是影响氮素流失的主要因子。

参考文献:

[1] 罗永霞,高波,颜晓元,等.太湖地区农业源对水体氮污染的贡献:以宜溧河流域为例[J].农业环境科学学报,2015,34(12):2318-2326.

[2] 冯勇.不同坡度和雨强条件下紫色土壤中流氮磷养分流失特征研究[J].水土保持应用技术,2014(4):4-6.

[3] 李虎军.坡长和植被对坡面水土养分流失特征的影响研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[4] 彭华.土壤侵蚀临界坡度研究进展[J].水土保持科技情报,2004(2):30-32.

[5] 马平安,郭全邦,李荣华,等.太行山片麻岩山地植被水土保持效益研究[J].地理学与国土研究,1999,15(3):43-46.

[6] 顾新庆,张金香.太行山片麻岩低山区水土流失规律研究[J].林业科技开发,2005,19(4):29-32.

[7] 钱金平,魏立涛,冯忠江.河北省山区水土流失现状及其成因分析[J].水土保持研究,2003,10(4):131-133.

[8] 马维玲,石培礼,宗宁,等.太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J].中国生态农业学报,2017,25(4):478-489.

[9] 孙辉,唐亚,谢嘉穗.植物篱种植模式及其在我国的研究和应用[J].水土保持学报,2004,18(2):114-117.

[10] 安娟.东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2012.

[11] 赵莹,耿灵生,陈凤琴,等.山东壤土坡面人工降雨水土流失规律研究[J].水土保持应用技术,2015(1):1-4.

[12] 湛芸.植物篱对紫色土水土特性的效应及作用机理[D].重庆:西南大学,2012.

[13] 龙天渝,刘金辉,刘祥章,等.地表覆盖对紫色土坡耕地壤中流流动和硝态氮运移过程的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):68-73.

[14] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.

[15] 段然,汤月丰,王亚男,等.不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1815-1822.

[16] 由政,姚旭,景航,等.不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J].水土保持研究,2016,23(6):20-25,31.

[17] 李学平,孙燕,石孝均.紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J].环境科学学报,2008,28(9):1832-1838.

[18] Ansar M F I S. Management of slopping lands for sustainable agriculture in Pothwar [J]. Journal of Agricultural Research, 2003, 52(5): 376-380.

[19] Singh S, Kulshrestha U C. Abundance and distribution of gaseous ammonia and particulate ammonium at Delhi, India [J]. Biogeosciences, 2012, 9(12): 5023-5029.

[20] 张丽萍,张锐波,吴希媛.不同管理方式竹林坡地降雨径流中氮磷流失特性模拟试验[J].水土保持学报,2011,25(6):1-6.

[21] 黄丽,丁树文,董舟,等.三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):9-14,22.

[22] 黄利玲,王子芳,高明,等.三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J].水土保持学报,2011,25(1):30-33.

[23] Mahmood T, Kaiser W M, Alir R, et al. Ammonium versus nitrate nutrition of plants stimulates microbial activity in the Rhizosphere [J]. Plant and Soil, 2005, 277(1/2): 233-243.

[24] 王云,徐昌旭,汪怀建,等.施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):500-507.