

# 片麻岩坡面花生不同生长时期水土及养分流失规律

马悦<sup>1,2</sup>, 郭年冬<sup>1</sup>, 张瑞芳<sup>2,3,4</sup>, 周大迈<sup>2,3,4</sup>, 王红<sup>2,3,4</sup>, 张爱军<sup>2,3,4</sup>

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省山区研究所, 河北 保定 071001;

3. 国家北方山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071000; 4. 河北省山区农业工程技术研究中心, 河北 保定 071000)

**摘 要:**通过室内人工模拟降雨的方法,研究了花生不同生长时期片麻岩坡面水土流失和养分流失特征。结果表明:花生不同生长时期产流产沙量不同,总体流失量均呈现出  $0\text{ d} > 20\text{ d} > 40\text{ d} > 60\text{ d}$ ,与对照( $0\text{ d}$ )相比,花生  $60\text{ d}$  坡面产流量减少了  $38\%$ ,产沙量减少了  $47\%$ ;不同生长时期坡面养分流失量随生长天数的增加而减少,与对照( $0\text{ d}$ )相比, $60\text{ d}$  坡面氮磷钾养分流失量分别减少了  $75\%$ ,  $45\%$ ,  $70\%$ ,降雨过程中硝态氮流失量始终高于铵态氮流失量;不同生长时期坡面养分流失量表现为钾流失总量  $>$  氮流失总量  $>$  磷流失总量,养分流失总量与产沙量之间方程拟合系数均达  $0.98$  以上,有着显著的正相关性;花生不同生长时期片麻岩坡面磷钾的流失主要以泥沙结合态为主,氮素流失为溶解态氮与泥沙态氮共存。

**关键词:**片麻岩; 水土流失; 径流; 养分流失量; 不同时期

**中图分类号:** S157.1; S565.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2016)05-0304-06

## Study on Soil and Nutrient Losses on Gneiss in Different Growth Periods of Peanut

MA Yue<sup>1,2</sup>, GUO Niandong<sup>1</sup>, ZHANG Ruifang<sup>2,3,4</sup>, ZHOU Damai<sup>2,3,4</sup>, WANG Hong<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Aijun<sup>2,3,4</sup>

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

China; 2. Mountain Area Research Institute of Hebei Province, Baoding, Hebei 071001, China; 3. National

Engineering Research Center for Agricultural in Northern Mountainous Areas, Baoding, Hebei 071000, China;

4. Agricultural Engineering Technology Research Center of Hebei Province Mountain, Baoding, Hebei 071000, China)

**Abstract:** Indoor simulation rainfall experiment was conducted to evaluate the effects of peanut at different growth stages on the surface soil and nutrient losses in gneiss area. The results showed that the yields of runoff and sediment during different growth periods peanut were different, and the loss amounts decreased in the order:  $0\text{ d} > 20\text{ d} > 40\text{ d} > 60\text{ d}$ . Compared with the control ( $0\text{ d}$ ), runoff slope with 60-day-peanut decreased by  $38\%$ , sediment production slope with 60-day-peanut decreased by  $47\%$ . The losses of nutrients during different growth stages decreased with the increase of the growth days, compared with the control ( $0\text{ d}$ ), the losses of nitrogen, phosphorus, potassium in the 60 days decreased by  $75\%$ ,  $45\%$ ,  $70\%$ , respectively, the loss of nitrate during the rainfall was always higher than ammonium. The amounts of nutrient loss at the different growth stages represented the cumulative loss order: potassium  $>$  nitrogen  $>$  phosphorus. The equation fitting factor of total nutrient loss and sediment yield was more than  $0.98$ , and there was a significant positive correlation; nutrient losses from gneiss area were mainly in the form of sediment combination state especially for phosphorus and potassium, nitrogen loss was mainly in the form of dissolved nitrogen or both dissolved nitrogen and sediment-associated nitrogen.

**Keywords:** gneiss; soil and water loss; runoff; amount of nutrient loss; different growth stage

土壤质地退化、地表结构破坏、土壤肥力下降均由坡面径流侵蚀造成,径流所携带的土壤养分流失也加速了地表水体的富营养化<sup>[1]</sup>。养分从土壤中流失

的途径,一是随地表径流水和沉积物的横向迁移;二是随水分下渗形成的纵向迁移,即养分的淋失。我国对土壤养分流失的研究较多,近年来多表现在不同种

收稿日期:2016-03-14

修回日期:2016-03-24

资助项目:河北省自然科学基金项目“人工模拟降雨条件下的片麻岩山坡地土壤氮素流失研究”(C2015204155)

第一作者:马悦(1992—),女,吉林白城人,硕士研究生,研究方向为植物营养生态研究。E-mail:mayuehebau@163.com

通信作者:张爱军(1970—),女,河北承德人,硕士生导师,研究员,主要从事植物营养生态与山区数字化研究。E-mail:zhangaijun@hebau.edu.cn

植模式及不同地貌的养分流失情况,但这些研究没有同时考虑坡面地表径流、泥沙与养分流失之间的关系<sup>[2]</sup>。不同生长时期下不同的植被覆盖状况与地表径流关系密切,增加地表覆盖能有效地减少地表径流量,防止水土流失<sup>[3]</sup>。河北省太行山区面积占全省总面积的 24%,低山片麻岩区是太行山区的重要类型区,约占太行山区面积的 62%<sup>[3]</sup>,主要由花岗片麻岩、砂质岩和石灰岩等风化形成,由于片麻岩类岩石易风化成土,土壤侵蚀现象严重<sup>[4]</sup>,且长期受到人类活动的影响,使该区山地森林生态系统遭到严重破坏<sup>[5]</sup>,水土流失现象频繁发生<sup>[6]</sup>,植被覆盖度急剧降低。本试验通过室内人工模拟降雨,研究花生不同生长期片麻岩坡面径流、泥沙及其中养分流失规律,为该区域坡耕地治理提供重要的科学理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验用土为河北省唐县片麻岩山坡地的新成土,土壤类型为褐土性土。唐县地理坐标为东经 114°28′—115°03′,北纬 38°38′—39°10′,暖温带大陆性季风气候,年平均温度 12.2℃,最高气温 41.4℃,最低气温-14.5℃,无霜期 195 d,常年降水量 539.2 mm。采用分层方式取土,分为 0—30 cm 和 30—50 cm 两层,并按顺序填装进试验用钢槽。填土时不进行过筛操作,以原状土放置 1 年进行自然密实。模拟降雨前土壤基本理化性质及基础地力分别为:全氮 1.37 g/kg,全磷 0.51 g/kg,全钾 44.11 g/kg,有效磷 7.08 mg/kg,含水量 8%~9%,容重 1.24 g/cm<sup>3</sup>。

试验所用钢槽规格为 1.5 m×0.5 m×0.5 m,可调坡度为 0°~30°,在钢槽底部和侧面设有渗流孔,防止土壤积水,在钢槽尾端接连“V”型径流收集槽<sup>[7]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验花生品种为冀花 4 号,实行两粒穴播,种植密度为 16 穴/m<sup>2</sup>,同时设置裸地对照。播种前按推荐施肥量统一进行合理施肥:N 为 106 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 106 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 为 40 kg/hm<sup>2</sup>,将肥料进行撒施,同时深耕覆土。试验设置 3 次重复,裸地、花生地为 1 次重复,于 2015 年 6 月 10 日进行播种,播种后分别在裸地期(0 d)、苗期(20 d)、结荚期(40 d)和荚果成熟期(60 d)进行降雨<sup>[8]</sup>。降雨地点在河北农业大学国家北方山区农业工程技术研究中心降雨大厅进行,采用降雨设备为喷射型仿真降雨设备(QYJY-503)。降雨高度 11 m,有效降雨面积约 72 m<sup>2</sup>,降雨强度变化范围为 10~200 mm/h,降雨均匀度在 90%以上,依据太行山片麻岩山区自然降雨强度,采用降

雨强度为 80 mm/h,设计钢槽坡度为 8°。降雨前测定植被覆盖度,降雨历时 60 min,产流开始后开始计时,每 10 min 收集 1 次径流,连续收集 6 次,直至降雨结束,测量径流总体积,并用滤纸将径流分离为泥沙和水样,计算每场降雨的总泥沙量和径流量,降雨次日测定水样中养分,1 周后测量泥沙风干后的重量,并分别对其中的养分含量进行测定。

### 1.3 测定方法

分别测定水样中溶解态氮磷钾、硝态氮、铵态氮和泥沙中颗粒态氮磷钾和有效磷的含量。水样中的总氮采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法测定,水溶态钾采用火焰光度法测定。泥沙中的全氮采用半微量凯氏法测定,全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定,全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 花生不同生长时期坡面土壤侵蚀过程

由表 1 可知,随着花生生长天数的增加,地表覆盖度随之增加,坡面产流时间表现为 0 d<20 d<40 d<60 d。地表覆盖度增大,使叶片拦截的雨量增多,雨滴对地表的扰动能力减弱,延缓了产流时间<sup>[5]</sup>。花生不同生长时期坡面的产沙模数、径流系数和土壤流失率不同,都随着生长天数的增加而有不同程度减少。花生 60 d 坡面产沙模数和土壤流失率最小,由此说明植被覆盖度的增加能有效防止土壤侵蚀造成的水土流失。与对照(0 d)相比较,花生 20 d 坡面产流量和产沙量分别减少了 8%、13%;40 d 坡面产流量和产沙量分别减少了 31%和 39%;60 d 坡面产流量和产沙量分别减少了 38%和 47%,水土保持效果显著。

表 1 花生不同生长时期产沙产流情况

天数/ d	覆盖 度/%	产流 时间/s	产流 量/m <sup>3</sup>	产沙模数/ (g·m <sup>-2</sup> )	径流 系数/%	土壤流 失率/%
0	0d	267d	0.026a	208.84a	0.86a	0.88a
20	26c	319c	0.024a	181.53b	0.85a	0.77b
40	48b	361b	0.018b	127.55c	0.60b	0.54c
60	65a	496a	0.016b	110.17c	0.50b	0.46c

注:相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。

由图 1 可以看出,片麻岩坡面在花生不同生长时期有着相似的产流产沙规律。在降雨初期产流率处于上升趋势,随着降雨历时,产流率趋于稳定。除对照坡面(0 d)降雨初期产沙率处于稳定趋势外,其他坡面产沙率一直处于先升高后下降的趋势。降雨过程中,花生 60 d 坡面产流率、产沙率均低于 40 d 和 20 d 坡面。花生 20 d 坡面最大产沙率产生在降雨初

期 20 min 时,为 1.28 g/min,在历时 50 min 后产沙率迅速降低,到降雨接近结束产沙率仍有下降的趋势;40 d 坡面在降雨 20~40 min 期间产沙率维持在

0.92 g/min;花生 60 d 坡面降雨初期 20 min 时产沙率达到最大,40 d 和 60 d 坡面产沙率达到峰值的时间均在降雨初期产生。

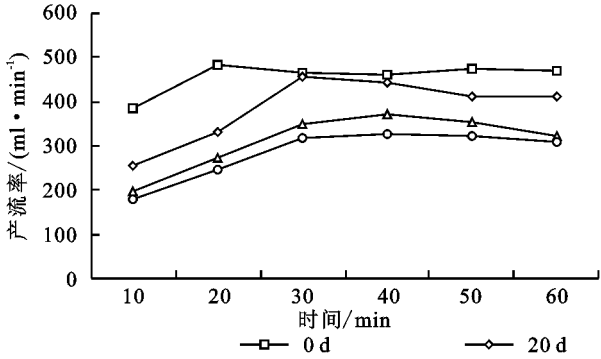
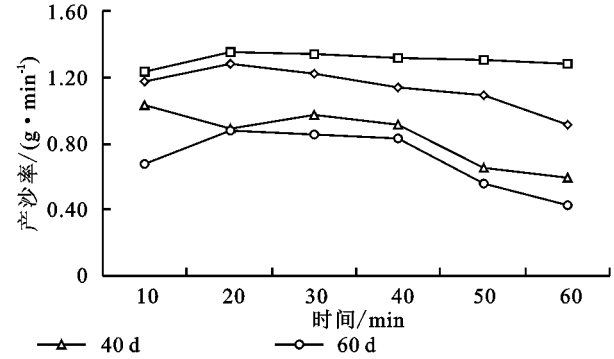


图 1 花生不同时期坡面产流产沙特征



2.2 花生不同生长时期坡面养分流失过程

2.2.1 径流氮素流失特征 由图 2 可以看出,花生不同生长时期坡面氮素流失程度不同,但养分流失规律大致相同:氮素浓度从降雨开始一直呈现出下降趋势,最终浓度变化趋于稳定。降雨的不同时期坡面溶解态氮浓度不同,呈现出 0 d>20 d>40 d>60 d 的规律。降雨初期花生 40 d 坡面溶解态氮浓度下降速度最快,0 d 和 20 d 次之,溶解态氮浓度降低速度最慢的是 60 d 坡面,降雨后期溶解态氮浓度均趋于稳定。这是由于花生 60 d 生长时期植被覆盖度最大,植物叶片拦截雨滴,降低了雨滴对地表土壤的击打作用,雨滴到达地面的动能降低,导致径流携带泥沙及养分的能力减弱<sup>[10]</sup>。同时,大部分养分在降雨初期被团粒结构较小的细土粒随径流带走,留下大量粗骨粒在坡面表面,使得降雨后期各养分浓度趋于稳定<sup>[11]</sup>。

期坡面磷流失浓度差异性较小,且磷流失浓度低于 0 d 径流磷浓度。在没有坡面覆盖的情况下,降雨初期土壤溶液和土壤表层颗粒吸附的磷较易被径流携带,且含量相对较高,随着降雨的持续,表层磷素不断被淋洗至土壤深层或随径流迁移,养分含量逐步降低并趋于稳定;坡面种植花生增加了覆盖度,减缓了径流对坡面的冲刷作用,增强入渗,减少了磷的损失量。

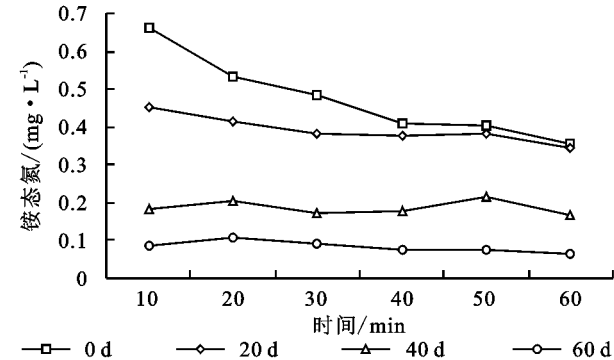
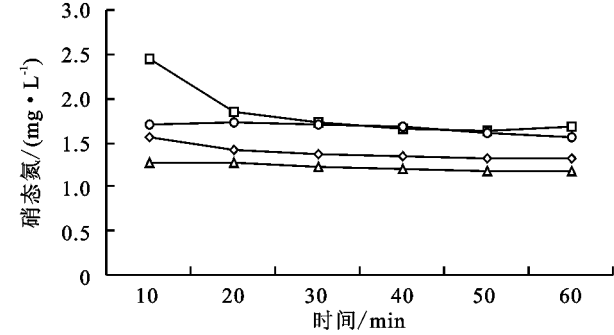
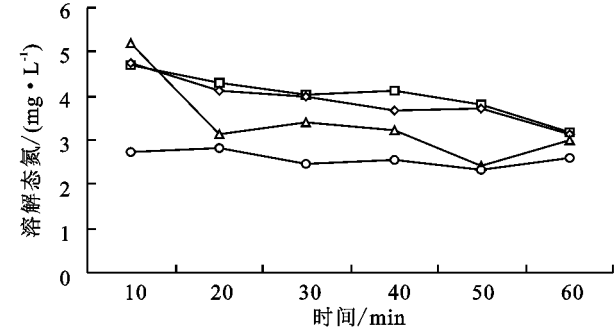


图 2 不同生长时期径流氮流失规律

铵态氮浓度变化规律与溶解态氮相似,随着花生的生长,径流中铵态氮的流失浓度逐渐降低,硝态氮浓度依次为 0 d>60 d>20 d>40 d,40 d 时坡面流失的硝态氮含量最小(图 2)。坡面硝态氮流失严重,这是由于硝态氮容易随水迁移造成的。通过对降雨过程中花生不同时期硝态氮和铵态氮流失量的对比可知,硝态氮的流失量总是高于铵态氮的流失量,这是由于土壤胶体对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附作用较大,使大部分可交换态铵保存在土壤中,而土壤颗粒带负电荷,对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的吸附作用很小,所以  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  更容易受到雨水的淋洗作用通过径流、侵蚀等汇入地表水,对水体造成污染<sup>[12]</sup>。

2.2.2 径流溶解态磷钾流失特征 花生不同生长时期径流流失的溶解态磷变化规律不同(图 3),花生 0 d 坡面径流磷浓度表现为持续降低的趋势,在 20~50 min 降雨期间下降速度最快;花生 20,40,60 d 生长时

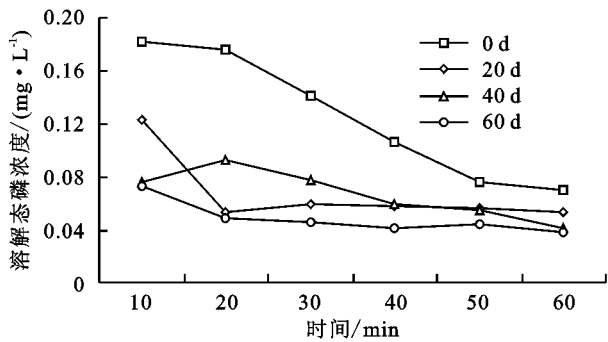


图3 径流磷流失规律

由图4可知,径流钾损失浓度随时间波动不大,在降雨后期趋于稳定。花生0 d坡面溶解态钾浓度最高,在降雨20 min之后浓度始终维持在5.69~5.74 mg/L,花生20 d和40 d坡面溶解态钾流失浓度差异不大,60 d坡面溶解态钾浓度在整个降雨过程中表现为最低,始终维持在2.79~3.07 mg/L。径流钾养分携带量最高,这是由于片麻岩新成土中钾含量本身较其他岩性土较高<sup>[8]</sup>。

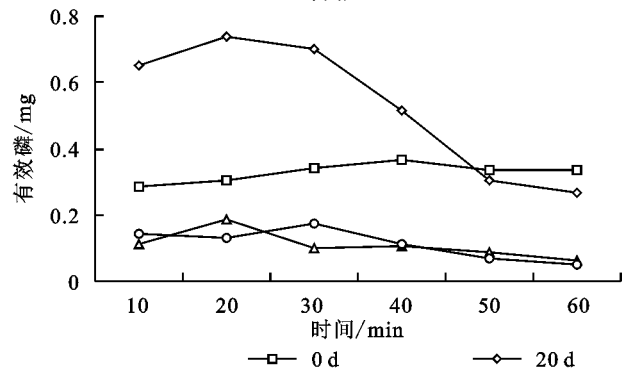
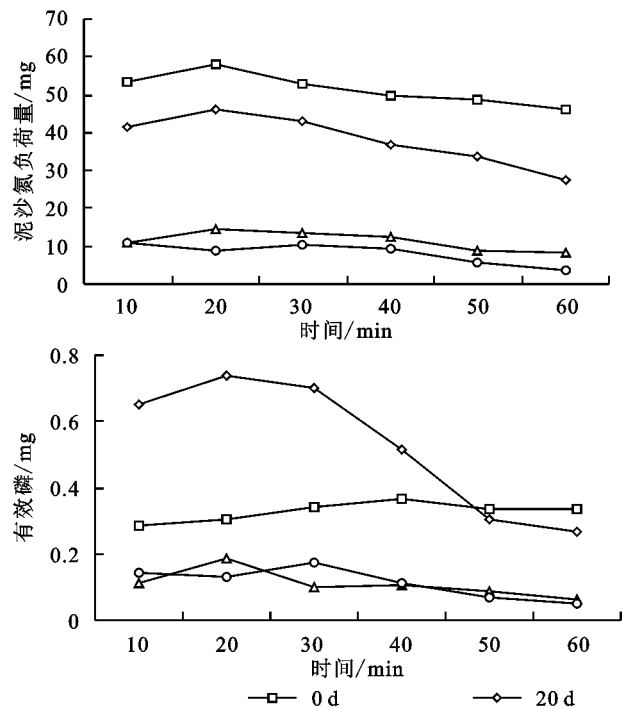


图5 泥沙中氮磷钾负荷量变化规律

片麻岩坡面在产沙过程中除花生40 d坡面颗粒态磷流失量呈下降趋势外,花生0,20,60 d坡面颗粒态磷流失量均有小幅度上升趋势后再下降;花生20 d坡面颗粒态磷流失量最大,60 d坡面颗粒态磷流失量最少,且流失泥沙中有效磷含量极小,在0.05~0.17 mg波动。由于土壤中的磷主要以有机无机体结合的方式存在于土壤团粒中,极易被土壤固定,并且片麻岩形成的土壤磷含量较低,所以溶解态磷含量极低<sup>[13]</sup>。花生20 d坡面颗粒态磷和有效磷流失量较其他生长时期异常增加,是因为土壤侵蚀首先

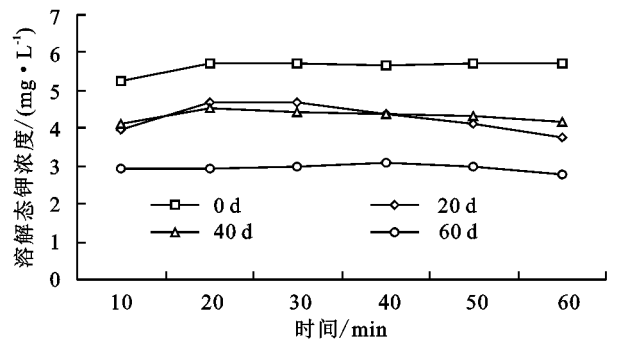
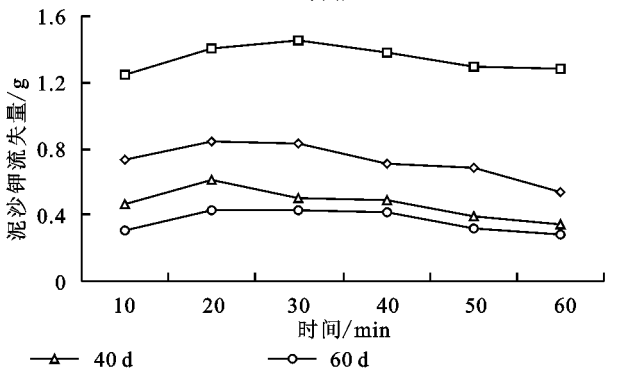
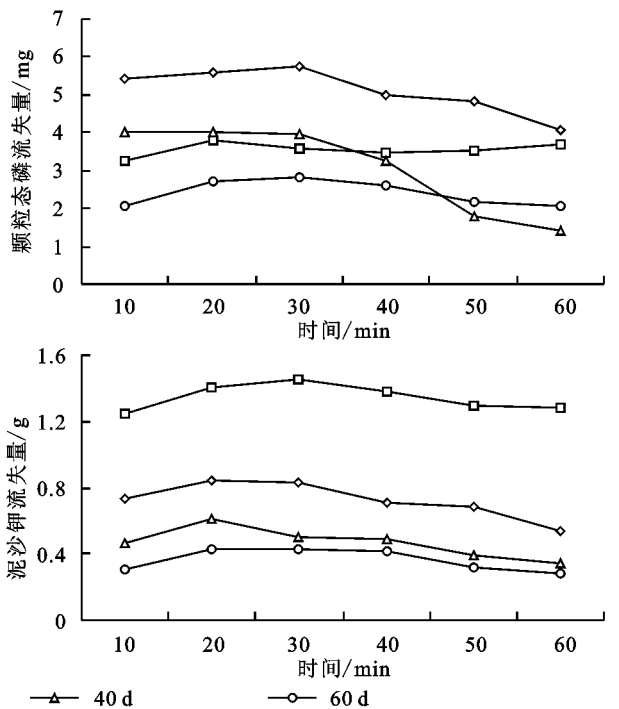


图4 径流钾流失规律

### 2.3 花生不同生长时期泥沙养分流失特征

由图5可以看出,泥沙氮负荷量在花生不同生长时期变化规律基本相同,由降雨初期氮流失量最大,到降雨后期氮流失量不断下降且趋于稳定。花生0 d坡面泥沙氮负荷量最大为58.14 mg,是20 d坡面泥沙最大氮负荷量的1.3倍,是40 d坡面泥沙最大氮负荷量的4.0倍,60 d坡面泥沙氮负荷量变化基本趋于稳定。说明随着花生的生长,植被覆盖度的增加有效地减少了氮营养分的流失。



是土壤细颗粒的流失,20 d植被覆盖度较低,雨滴对土壤的打击使细颗粒的侵蚀量较40,60 d坡面增多,同时细颗粒对养分的吸附作用较强,导致养分富集程度较高<sup>[14]</sup>。

泥沙中钾含量的损失远远高于泥沙中氮磷含量的损失,且在降雨过程中含量变化较为平稳,颗粒态钾流失量依次为0 d>20 d>40 d>60 d。组成片麻岩的矿物中钾含量很高,因此岩石风化形成的土壤中钾含量也很高,降雨过程中由于径流冲刷和侵蚀作用,泥沙所携带的钾含量也很高<sup>[15]</sup>;同时片麻岩中的

钾主要以无机态吸附在土壤颗粒表面,不会因为径流对不同坡面土壤黏粒的选择性搬运而导致各时段含量有较大差异<sup>[16]</sup>。

### 2.4 花生不同生长时期与养分流失量的关系

由表 2 可以看出,在 80 mm/h 的特大雨强下,花生不同生长时期氮磷钾流失量不同,随着生长天数的增加,各养分含量逐渐减少并趋于稳定,钾流失量最多,其次是氮、磷流失量最小。土壤自身理化性质与养分流失密切相关,片麻岩特性即岩石风化土壤的钾含量较其他土壤高,且氮容易被淋失和在径流中损失,但磷容易被土壤所固定<sup>[17]</sup>,所以径流损失中钾最多,磷最少。随着生长天数的增加,氮流失量也逐渐

减少,与生长天数表现出明显的负相关。氮自身活性较大,花生 0 d 坡面流失量最大为 432.49 mg,是 60 d 坡面氮流失量的 4 倍;磷在土壤中移动性较差,与对照(0 d)相比,花生 20 d 坡面磷损失量有效减少了 1.6%,40 d 坡面磷损失量有效减少了 44%,60 d 坡面磷损失量有效减少了 45%,花生不同生长时期磷流失量变化较小。由表 4 可知,颗粒态氮流失量所占比例为 40%~62%,可知氮流失过程中溶解态氮和颗粒态氮共存;而磷钾的颗粒形态所占含量一直在 85%左右,因此流失的磷钾主要以泥沙结合态为主,且花生不同生长时期的不同覆盖情况变化与磷钾养分流失形态相关性不大。

表 2 花生不同时期坡面养分流失情况

天数/d	氮流 失量/mg	磷流 失量/mg	钾流 失量/mg	颗粒态氮所占 比例/%	颗粒态磷所占 比例/%	颗粒态钾所占 比例/%
0	432.49a	32.74a	8447a	62a	76c	86a
20	330.05b	32.23b	4452b	59a	79b	85a
40	143.41c	18.31c	2869c	45c	79b	84a
60	106.39c	17.94c	2548c	40c	81a	85a
总计	1012.41	101.22	18316	53	80	85

### 2.5 坡面养分流失模拟对比分析

研究表明产流产沙量与养分流失量之间有着密切的关系<sup>[18]</sup>。由表 3 可以看出,花生不同生长天数产流量与产沙量之间存在着极显著的正相关性<sup>[19]</sup>。随着花生生长天数增加产流量减少,产沙量也随之减少;氮流失量与产沙量方程拟合系数达到 0.999 5,呈高度相关,随着产沙量的减少,氮养分流失量也随之降低;对磷钾流失量与产沙量进行方程拟合,拟合系数达到了 0.98 以上,呈显著相关。

表 3 产流量、养分流失量(y)与产沙量(x)之间回归方程

类型	回归方程	拟合系数
产流量与产沙量	$y = -3E-07x^2 + 0.0002x - 0.006$	0.9987
氮流失量与产沙量	$y = 0.0011x^2 + 3.2318x - 290.87$	0.9995
磷流失量与产沙量	$y = -0.0021x^2 + 0.8697x - 56.994$	0.9817
钾流失量与产沙量	$y = 1.2296x^2 - 341.42x + 26054$	0.9894

## 3 结论

(1) 随着花生的生长,产流时间随地表覆盖度的增加而延长,表现为 0 d<20 d<40 d<60 d。与对照(0 d)相比,花生 60 d 坡面产流时间增加了 46%,产沙模数、径流系数和土壤流失率分别减少了 47%,42%,48%,产流量和产沙量分别减少了 38%和 47%,不同生长时期坡面的产沙模数、径流系数和土壤流失率也不同,都随着花生生长天数的增加而有不同程度减少,水土保持效果显著。

(2) 花生不同生长时期径流中氮磷钾养分流失都呈现出降雨初期波动较大,降雨后期浓度变化趋于

稳定。除对照(0 d)外,坡面溶解态氮浓度呈现出 0 d>20 d>40 d>60 d;铵态氮浓度变化规律与溶解态氮相似,但花生不同时期硝态氮浓度依次为 60 d>20 d>40 d,花生 40 d 坡面流失的硝态氮含量最小;因土壤团粒对正负电荷的吸附和排斥作用导致硝态氮的流失量总是高于铵态氮的流失量。花生不同生长时期溶解态钾流失量最大,溶解态磷流失量最小。氮素流失过程中颗粒态氮流失量所占比例为 40%~62%,故溶解态氮和颗粒态氮共存,而磷钾的颗粒形态所占含量一直在 85%左右,因此流失的磷钾主要是泥沙结合态。

(3) 花生不同生长时期产流量、氮磷钾养分流失量都与产沙量呈显著正相关,这与赵宇等<sup>[20]</sup>在紫色土壤坡面养分流失规律研究中表明的侵蚀泥沙养分与产沙产流量可用二次函数表达是一致的。氮养分流失量与产沙量方程拟合系数达到 0.999 5 以上,呈高度相关;对磷钾流失量与产沙量进行方程拟合,拟合系数均达到了 0.98 以上,呈显著相关。

### 参考文献:

[1] 钱婧,张丽萍,王小云,等. 人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(5):6-10.  
[2] 荆文涛,陈澍,祖艳群,等. 不同种植模式下红壤坡田水土及养分流失研究[J]. 环境科学与技术,2015,38(11):66-70.  
[3] 史东超,张金柱,郭素平. 太行山片麻岩区坡地水土流失规律研究[J]. 河北林果研究,2003,18(1):13-19.  
[4] Xinqing G U. Dynamic patterns of soil and water losses

- in low-lying mountains of gneiss in Taihang Mountain [J]. China Forestry Science and Technology, 2005, 19 (4):29-31.
- [5] 王升,王全九,董文财,等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报,2012,26 (4):23-27.
- [6] 陈建卓. 太行山石灰岩山地水土保持型生态农业试验研究[J]. 水土保持通报,2005,25(1):82-87.
- [7] 张光辉,刘宝元,李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. 水土保持通报,2008,27(6):56-60.
- [8] 赵海云,陈继富,王宏丽,等. 优质富硒谷新品种晋谷 29 号选育及其小米深加工[J]. 作物研究,2007,21(3):394-395.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 张兴昌,刘国彬,付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学,2000,21(6):16-19.
- [11] 张佳琪,王红,张瑞芳,等. 不同土地利用方式下片麻岩坡面养分流失规律的研究[J]. 水土保持研究,2014,21 (5):122-125.
- [12] Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed spray-plate sprinklers on soil infiltration, runoff and sediment yield [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2):213-221.
- [13] 张佳琪,王红,张瑞芳,等. 雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(3):42-45.
- [14] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报,2010(22):6091-6101.
- [15] 陈晓燕,王茹,卓素娟. 不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J]. 水土保持学报,2012,26(6):1-5.
- [16] 朱子龙,周大迈,张爱军,等. 不同下垫面太行山片麻岩坡面水土及养分流失规律研究[J]. 水土保持学报,2014,28(6):61-65.
- [17] Mark A S, Clare M H, Jan W E, et al. The European Nitrogen Assessment: Source, Effects and Policy Perspective [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [18] Lavakush Y J, Verma J P, Jaiswal D K, et al. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa*) [J]. Ecological Engineering, 2014, 62(1):123-128.
- [19] 张赫斯,张丽萍,朱晓梅,等. 红壤坡地降雨产流产沙动态过程模拟试验研究[J]. 生态环境学报,2010,19(5):1210-1214.
- [20] 赵宇,陈晓燕,康静雯. 人工模拟降雨条件下紫色土坡面养分流失特征分析[J]. 水土保持学报,2013,27(1):31-34.

~~~~~  
(上接第 303 页)

- [7] 张晓平,朱道林,许祖学. 西藏土地利用多功能性评价[J]. 农业工程学报,2014,30(6):185-194.
- [8] 宋小青,欧阳竹. 中国耕地多功能管理的实践路径探讨[J]. 自然资源学报,2012,27(4):540-551.
- [9] Global Land Project. Science Plan and Implementation Strategy[R]. Stockholm:IGBP Secretariat, 2005.
- [10] 张红旗,许尔琪,朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. 资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [11] 陈睿山,蔡运龙,严祥,等. 土地系统功能及其可持续性评价[J]. 中国土地科学,2011,25(1):8-15.
- [12] Fleskens L, Duarte F, Eicher I. A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves[J]. Journal of Rural Studies, 2009,25(1):141-155.
- [13] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services [J]. Ecological Economics, 2002,41(3):393-408.
- [14] 刘沛,段建南,王伟,等. 土地利用系统功能分类与评价体系研究[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2010,36(1):113-118.
- [15] 陈婧,史培军. 土地利用功能分类探讨[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):536-540.
- [16] 张洁瑕,陈佑启,姚艳敏,等. 基于土地利用功能的土地利用分区研究:以吉林省为例[J]. 中国农业大学学报,2008,13(3):29-35.
- [17] 甄霖,曹淑艳,魏云洁,等. 土地空间多功能利用:理论框架及实证研究[J]. 资源科学,2009,31(4):544-551.
- [18] 郭欢欢,李波,侯鹰. 基于土地功能的土地资源承载力研究:以北京市海淀区为例[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2011,47(4):424-427.
- [19] 吴琼,王如松,李宏卿,等. 生态城市指标体系与评价方法[J]. 生态学报,2005,25(8):2090-2095.
- [20] 周伟,曹银贵,乔陆印. 基于全排列多边形图示指标法的西宁市土地集约利用评价[J]. 中国土地科学,2012,26(4):84-90.
- [21] 程龙,董捷. 基于全排列多边形综合图示指标法的武汉城市圈土地集约利用评价[J]. 水土保持研究,2014,21 (1):183-187.
- [22] 饶清华,邱宇,许丽忠,等. 基于多目标决策的节能减排绩效评估[J]. 环境科学学报,2013,33(2):617-625.
- [23] 王金朔,张庶. 基于全排列图示指标法的城乡统筹发展评价:以海口市为例[J]. 江西农业学报,2014,26(3):139-142.
- [24] 程龙,董捷. 基于全排列多边形图示指标法的城乡建设用地增减挂钩适宜区评价[J]. 农业现代化研究,2013,34(4):472-476.