DOI: 10.5846/stxb201802040296
王荣嘉, 高鹏, 李成, 刘潘伟, 孙鉴妮, 刘晴.模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征.生态学报,2019,39(8): - .
Wang R J, Gao P, Li C, Liu P W, Sun J N, Liu Q.Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall.Acta Ecologica Sinica,2019,39(8): - .

模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征

王荣嘉, 高 鹏*, 李 成, 刘潘伟, 孙鉴妮, 刘 晴
山东农业大学林学院,国家林业局泰山森林生态站,山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 泰安 271018

摘要:为探讨人工林地地表径流和壤中流产流机制及其氮素流失规律,选择鲁中南山区典型林地麻栎林为研究对象,采用模拟降雨试验方法,研究麻栎林与荒草地的产流及氮素流失特征。结果表明:(1)麻栎林的总产流量、地表径流量、壤中流量分别是荒草地的 80.5%、61.4%、162.2%。地表径流产流呈不断增加且趋于稳定的特征;壤中流产流时间明显滞后于地表径流的,产流过程径流量波动比较小,保持相对稳定。地表径流量和壤中流量随时间的变化过程可分别通过对数函数和多项式函数进行模拟。(2)麻栎林的全氮总流失浓度、地表径流全氮流失浓度、壤中流全氮流失浓度为 11.5、13.1、8.9 mg/L,分别比荒草地低 19.0%、13.8%、8.2%。地表径流全氮流失浓度一般前期较大,而后递减并趋于稳定;壤中流全氮流失浓度在整个产流过程中保持相对稳定。地表径流和壤中流全氮流失浓度随降雨时间的变化过程可分别通过幂函数和多项式函数进行模拟。(3)在整个降雨产流过程中,麻栎林和荒草地的地表径流量分别占总产流量的 61.8%和 81.1%,麻栎林和荒草地的地表径流全氮流失量分别占全氮总流失量的 70.4%和 87.0%,径流、氮素的流失都以地表径流为主。与荒草地相比,麻栎林具有明显增加壤中流,减少氮素流失效果。

关键词:鲁中南山区;模拟降雨;地表径流;壤中流;氮素流失

Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall

WANG Rongjia, GAO Peng*, LI Cheng, LIU Panwei, SUN Jianni, LIU Qing
Forestry College of Shandong Agricultural University, Mountain Tai Forest Ecosystem Research Station of State Forestry Administration, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Tai'an 271018, *China*

Abstract: To explore the mechanism of runoff and loss of nitrogen in artificial forest surface flow and interflow, the typical *Quercus acutissima* forest in a hilly area of middle southern Shandong Province was evaluated as the research object. Simulated artificial rainfall experiments were carried out to examine the characteristics of runoff and nitrogen loss in *Q. acutissima* forest land and grassland. The results showed the following: (1) The total flow, surface flow, and interflow in the *Q. acutissima* forest land were 80.5%, 61.4%, and 162.2% of that in grassland, respectively. The surface flow process tended to increase and then were stable. The interflow generation time clearly lagged behind the surface flow, and the runoff fluctuation of interflow was relatively smaller and more stable than that of surface flow. The relationship between the logarithm function and polynomial function was determined from the surface flow and interflow and rainfall time. (2) The total nitrogen output density, total nitrogen output density of surface flow, and total nitrogen output density of interflow in the *Q. acutissima* forest land were 11.5, 13.1, and 8.9 mg/L, which were 19.0%, 13.8%, and 8.2% lower than those of

基金项目:山东省自然科学基金项目(No.ZR2016CM49);国家林业公益性行业专项课题(No.2014303-08)
收稿日期:2018-02-04; **网络出版日期**:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gaopengy@163.com

grassland, respectively. The output density of nitrogen through surface flow was high at the initial time but was generally stable as simulated rainfall continued. The output density of nitrogen through interflow remained relatively stable throughout the runoff process. The concentration of runoff and total nitrogen loss in surface flow and interflow revealed a relationship between the power function and polynomial function. (3) Throughout the simulated rainfall process, the surface flow in *Q. acutissima* forest land and grassland accounted for 61.8% and 81.1% of the total runoff, respectively. Total nitrogen loss from the surface flow in *Q. acutissima* forest land and grassland accounted for 70.4% and 87.0% of the total nitrogen loss, respectively, and the runoff and nitrogen losses from the surface flow accounted for a high proportion. Compared to grassland, the *Q. acutissima* forest land showed significantly increased interflow and decreased surface flow and nitrogen loss.

Key Words: hilly area of middle southern Shandong Province; simulated rainfall; surface flow; interflow; nitrogen losses

降雨能够引起产流,随着雨滴的击溅地表与地表径流的产生,造成土壤中氮磷等元素随地表径流流失[1],并产生面源污染。为了解径流产流与氮磷流失特征,减少氮磷流失,防治面源污染,国内外不少专家学者都进行了大量的研究。有些学者针对某一地区的不同土地利用类型的产流及氮磷流失特征进行研究,如Lewis 等[2]针对热带湿林的氮磷流失进行研究,周林飞等[3]关于辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮磷流失特征的研究,王国重等[4]在豫西南山区对不同土地类型氮磷流失进行研究,吕婷等[5]在长兴县合溪水库集水区根据不同土地利用方式对径流氮流失特征进行研究;也有学者根据不同水土保持措施对产流与氮磷流失影响进行研究,如王萍[6]研究拦截草带对坡耕地水土流失及氮磷输出的控制作用研究,王全九等[7]在黄土坡地研究不同植被覆盖对产流产沙及氮磷流失的影响,Choi 等[8]关于植物过滤带(VFS)对氮磷污染的控制作用的研究。研究方法也以野外径流小区观测[9-11]和人工模拟降雨[12-14]居多。但目前的研究大多是对径流产流及氮磷流失特征进行研究,研究对象也以地表径流为主[15-17],关于林地土壤中壤中流和地表径流流失比例、及其氮素流失比例等问题尚缺少较为深入地研究。而已有研究发现地表径流与壤中流迁移特征差异较大,随壤中流迁移的氮磷元素对导致的水体富营养化的作用不容忽视[18]。因此,本研究选择鲁中南山区典型区域药乡小流域的麻栎林地及荒草地为研究对象,通过人工模拟降雨试验,研究麻栎林与荒草地的地表径流与壤中流及氮素流失特征,探讨麻栎林地产流及其氮素流失机制,为鲁中南山区径流和氮素流失规律研究及其有效控制与水土保持林的营造提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于泰山森林生态系统国家定位观测研究站(117°04′—117°22′E, 36°17′—36°27′N)进行,该站位于山东省泰安市黄前水库药乡小流域,地处北方土石山区鲁中南山丘区西北部(图 1),所属一级流域为黄河流域,支流为大汶河。气候类型属暖温带大陆性亚湿润季风气候,其多年平均气温为 18.5 ℃,≥10 ℃的活动积温为 3821 ℃,无霜期为 196 d,多年平均降水量为 727.9 mm,75%的降水集中于 6—9 月。土壤类型主要为棕壤,主要人工林植被有麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、赤松(*Pinus densiflora* Sieb.)、日本落叶松(*Larix kaempferi* Carr.)等;灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill.var. *spinosa*(Bunge)Hu)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* L.)以及南蛇藤(*Celastrus orbiculatus* Thunb.)等;草本主要有黄背草(*Themeda triandra* Forsk. Var.)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*(L.)Keng)等。

1.2 试验设计

1.2.1 野外取样

本研究是在泰山森林生态系统国家定位观测研究站进行的,该站位于山东省泰安市黄前水库药乡小流

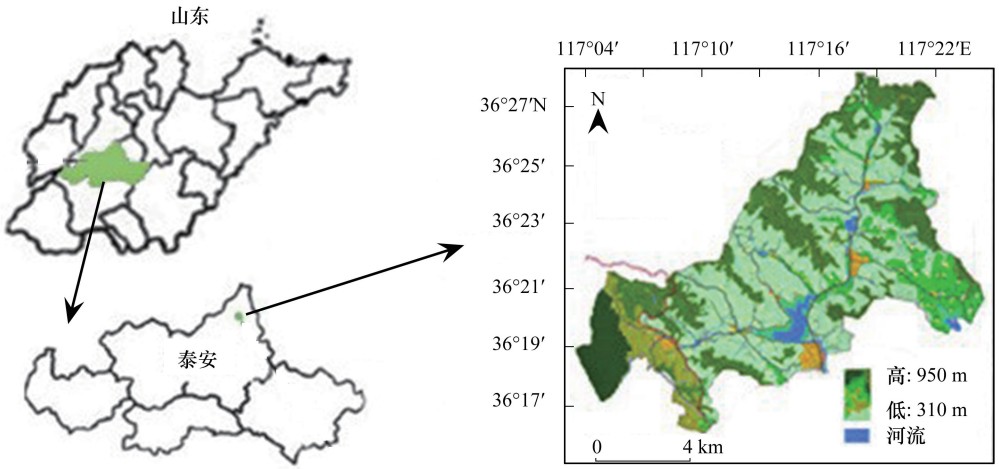


图 1　研究区地理位置图

Fig.1　Geographical location of the study area

域,地处北方土石山区鲁中南山丘区的典型区域。麻栎林是该地区典型水土保持林树种,药乡小流域是代表鲁中南山丘区的典型区域,选择该流域麻栎林进行观测试验,具有一定的典型性和代表性。

于 2017 年 7 月选择该区具有代表性的麻栎林作为研究对象,建立 60 m×80 m 样方,调查林地基本情况。该麻栎林样地树龄为 42 年,林分密度 825 株/hm^2,郁闭度 0.65,样地地表枯落物层的厚度为 3—4 cm。地表植被以麻栎幼苗和南蛇藤为主,样地灌木层盖度 10%,草本层盖度 41%,草本植物以黄背草与野艾蒿为主。该区土层平均厚度 40 cm,土壤类型为棕壤,坡度为 14°—18°。选择麻栎林与其对照荒草地的典型标准地,结合试验径流槽,每个标准地选取 3 个地形地貌、植被覆盖等条件相一致的取样样地(共 6 个样地),每个取样大小为 1.5 m×2 m,用于平行降雨。根据该土石山区土层平均厚度约为 40 cm,并考虑到标准地的土层厚度的实际情况,取土层深度为 40 cm。试验原状土样采集时,参考了钱婧[19]、Mardamootoo[20]以及王国重[4]等人取土方法,尽可能保持地表植被和土层不被破坏,将地表植被、枯落物层和土层进行分开和分层(每 10 cm 土层取土一次并将土样按由上至下的顺序封装编号)取样。取样后,运至山东农业大学实验基地人工降雨大厅,每个土样的土体按照取样先后顺序放入试验径流槽内并静置堆放一定时间(30 d 左右),并再次测定土壤容重等指标,使得径流槽土样的土壤容重接近原状土样的土壤容重值,然后进行人工模拟降雨产流试验。试验标准地基本情况见表 1。

表 1　麻栎林与荒草地标准地基本情况

Table 1　*Q. acutissima* forest and grassland standards of the basic situation

样地 Sample area	土壤类型 Soil type	土层厚度 Soil thickness/cm	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	总孔隙度 Total porosity/%	沙粒含量 Sand content/%	粉粒含量 Silt content/%	粘粒含量 Clay content/%	前期土壤含水量 Soil water content before rainfall/%	有机碳 Organic carbon/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	平均坡度 Average slope/(°)
麻栎林地 *Q. acutissima*	棕壤	40	1.15	49.28	64.30	32.44	3.26	15.9	34.2	2.01	50	16
荒草地 Grassland	棕壤	40	1.48	41.26	59.34	36.73	3.93	13.5	32.9	1.92	35	16

粒径分级标准采用美国农部制;TN:全氮,Total nitrogen

1.2.2　人工模拟降雨试验

人工模拟降雨试验采用南京南林电子科技有限公司研制的 NLJY-10 人工模拟降雨系统,具体参数见表 2。根据泰安当地近 30 年降雨资料中降雨强度水平,考虑到该区暴雨历时短、强度大的特点,并结合试验需

要,模拟降雨试验采用一种代表性雨强,即重现期为 2.5 年的雨强 75 mm/h。人工模拟降雨系统下部放有试验径流槽,内有供试土壤。考虑到该研究区标准地坡度为 14°—18°,因此,径流槽倾斜坡度确定为 16°,与标准地平均坡度一致且具有代表性。试验径流槽可同时收集地表径流和壤中流(图 2)。为了保证试验准确性,模拟降雨时 6 个样地进行平行降雨实验,共进行 6 次降雨实验(麻栎林和荒草地各 3 次)。为保证降雨强度均匀稳定,降雨前,对降雨强度进行 2 次率定,2 次率定误差不超过 5%,于降雨结束后再次率定,取前后率定结果的平均值作为该试验的降雨强度,每次降雨历时 40 min。降雨开始后,记录降雨开始时间、地表径流以及壤中流产流时间,径流产流后,每间隔 5 min 采集地表径流和壤中流各一次,并记录采样径流量,用于计算不同时刻的径流量。记录降雨停止时间、径流停止时间,采样直至降雨径流结束。

表 2 人工模拟降雨系统参数表

Table 2 Artificial simulated rainfall system parameter table

NLJY-10 人工模拟降雨系统 NLJY-10 Artificial simulated rainfall system	
有效降雨面积 Effective rainfall area	1.5 m×2.0 m
降雨高度 Height of rainfall	3 m
雨强连续变化范围 Rain intensity continuous variation range	30—150 mm/h
降雨均匀度系数 Rainfall uniformity coefficient	大于 0.86
雨滴大小调控范围 Raindrop size control range	1.7—5.0 mm
降雨调节精度 Rainfall regulation accuracy	7 mm/h
降雨测量精度 Rainfall measurement accuracy	0.01 mm/h

1.3 样品分析方法及数据分析

水样采集后加浓硫酸至 pH 值为 1 左右进行保存并带到山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室进行实验。水样全氮(TN)测定采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法[21],水样中的全氮(TN)包括铵态氮、硝态氮、亚硝态氮和能被转换为铵盐的有机氮,本研究所采用的方法是将水样在过硫酸钾存在条件下,通过高压消煮,将亚硝酸根、铵、有机态氮均转换成硝酸根,通过计算出硝酸根的浓度从而计算出全氮(TN)的浓度;由于试验用水一致,故不考虑试验用水对结果的影响。土壤容重和土壤孔隙度测定采用环刀法。

1.4 数据处理与统计分析

文中数据、图表采用 Excel 2007 处理分析。

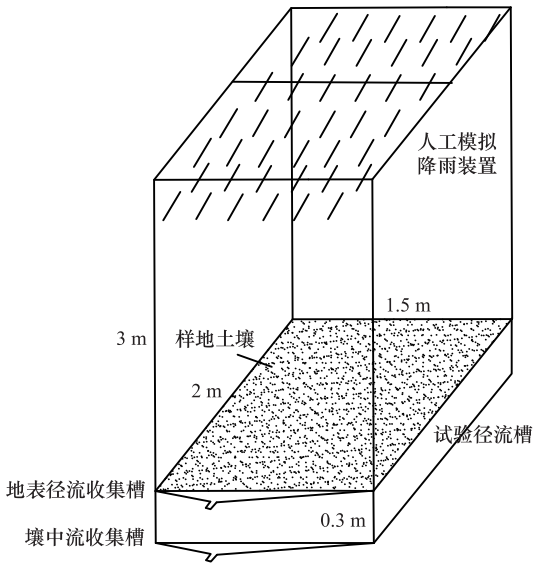


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experiment

2 结果与讨论

2.1 麻栎林和荒草地产流过程特征

由表 3 和图 3 可以看出,麻栎林与荒草地的地表径流均产生较早,麻栎林在 3 min 时开始产流,荒草地在 2 min 时开始产流,麻栎林的地表径流产流时间滞后于荒草地的,这是由于麻栎林地表植被覆盖度较高,起到拦截地表径流、延缓地表径流产流的作用。二者的地表径流量均呈现不断增加且趋于稳定的特征,这是由于在降雨初期,土壤含水量较低且未达到饱和,到达地表的降雨先进行土壤入渗,用于填充土壤孔隙,故初期的地表径流产流较少;随着降雨的不断进行,到达地表的水分也越来越多,土壤含水量逐渐增加达到饱和状态,并开始产生壤中流,降雨雨水下渗速度也开始接近于饱和土壤的稳定下渗速度,地表径流量到达最大值并保持稳定。陈晓冰等[22]在竹林地的研究也发现,降雨径流开始产生时径流量相对较小,随着降雨时间的持续,

地表径流量逐渐增大,随着时间推移,地表径流量趋于稳定,这与本研究结果相一致。根据试验结果,麻栎林的地表径流量为9.7 L,荒草地的为15.8 L,麻栎林地表径流量是荒草地的61.4%,这是由于麻栎林的地表植被覆盖大于荒草地的,且有一层枯落物层,拦截了一部分到达地表的雨水,促进雨水下渗,对地表径流的有一定拦截作用,减少了地表径流量。陈安磊等[23]在桃源县的通过野外径流小区研究发现,自然林的径流量仅为草地区径流量的25.3%,自然林的径流量小于草地区的;吕婷等人[5]研究发现,在自然降雨条件下,林地(人工林)的径流量(360.3 m^3/hm^2)小于荒地的径流量(900.9 m^3/hm^2),这都与本研究结果一致。Hosseini 等[24]研究发现,植被覆盖对减少径流的起到了重要作用,而本研究中,麻栎林的植被覆盖大于荒草地的,其地表径流量也大于荒草地的,与 Hosseini 等[24]研究结果相一致。

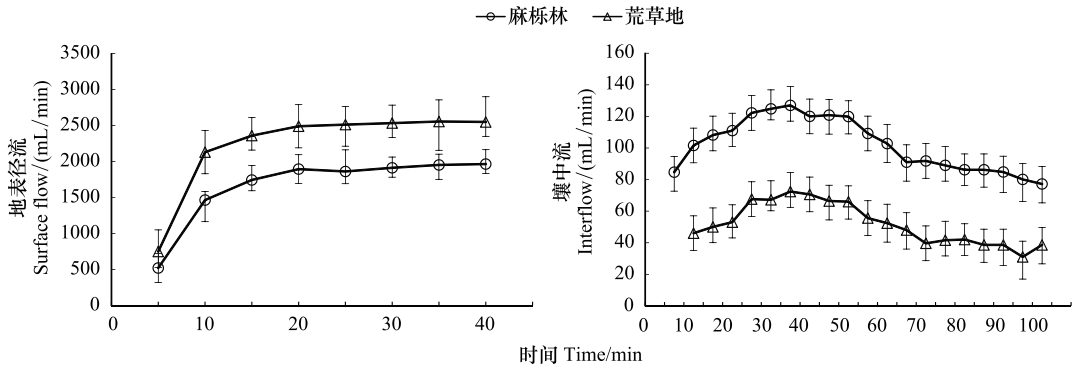


图 3　麻栎林和荒草地地表径流与壤中流产流特征

Fig.3　Characteristics of surface flow and interflow in *Q. acutissima* forest and grassland

表 3　麻栎林和荒草地产流特征

Table 3　Characteristics of flow in *Q. acutissima* forest and grassland

样地 Sample area	径流类型 Runoff type	样地 1 Sample area 1 降雨量 Rainfall/mm	产流时间 Runoff time/min	径流量 Runoff volume/L	占比 Ratio/%	样地 2 Sample area 2 降雨量 Rainfall/mm	产流时间 Runoff time/min	径流量 Runoff volume/L	占比 Ratio/%
麻栎林地	地表径流	–	3	9.2	61.3	–	3	9.8	62.4
Q. acutissima	壤中流	–	8	5.8	37.7	–	7	5.9	37.6
	总产流	50	–	15.0	–	50	–	15.7	–
荒草地 Grassland	地表径流	–	2	15.5	82.4	–	2	15.6	80.0
	壤中流	–	10	3.3	17.6	–	11	3.9	20.0
	总产流	50	–	18.8	–	50	–	19.5	–

样地 Sample area	径流类型 Runoff type	样地 3 Sample area 3 降雨量 Rainfall/mm	产流时间 Runoff time/min	径流量 Runoff volume/L	占比 Ratio/%	样地平均值 Sample average 降雨量 Rainfall/mm	产流时间 Runoff time/min	径流量 Runoff volume/L	占比 Ratio/%
麻栎林地	地表径流	–	2	10.1	61.6	–	3	9.7	61.8
Q. acutissima	壤中流	–	7	6.3	38.4	–	7	6	37.2
	总产流	50	–	16.4	–	50	–	15.7	–
荒草地 Grassland	地表径流	–	2	16.2	80.2	–	2	15.8	81.1
	壤中流	–	9	4.0	19.8	–	10	3.7	19.9
	总产流	50	–	20.2	–	50	–	19.5	–

由表 3 可以看出,麻栎林与荒草地的壤中流的产流时间分别为 7 min 时和 10 min,均滞后于地表径流的,这是由于当土壤水分含量达到饱和才开始产生壤中流。由图 3 可以看出,麻栎林和荒草地的壤中流量波动比较小,产流过程保持相对稳定,这是因为壤中流产流是由于土壤中水分达到饱和时产生,下渗速度已基本稳定。本研究表明,麻栎林地的土壤孔隙度大于荒草地的,而麻栎林地的土壤容重则小于荒草地的(表 1),这是

因为与荒草地相比,麻栎林地中的地表植被较多,枯枝落叶物较多,加之地下部分树木根系的作用,较好地改良了土壤的结构,使得麻栎林地土壤孔隙度增加,土壤容重降低,有利于地表径流下渗,促进壤中流的形成与发展,本文中,麻栎林壤中流量为 6 L,是荒草地壤中流量的 162.2%。沈紫燕[25]通过模拟降雨试验研究发现,在相同土壤条件下,容重为 1.05 g/cm^{3}的土壤首先产流,容重为 1.15、1.20 g/cm^{3}的土壤相继产流,并且平均壤中流强度的大小和壤中流总量的大小关系为容重 1.05>1.15>1.20,土壤容重越大,孔隙率越小,土壤越密实,越不利于壤中流的产生,容重越大壤中流越难产生。这与本研究中土壤容重越小越有利于壤中流产流的结论相一致。在杜祥运等[26]研究中,在同一雨强下,壤中流量大小排序依次为草灌>草本>灌木>裸地,地表覆盖度越高,壤中流量也越大,而本研究中,麻栎林的地表覆盖度大于荒草地的,壤中流量也大于荒草地的,与杜祥运等[26]研究相一致。

由表 3 还可以看出,麻栎林的总产流量小于于荒草地的,是荒草地的 80.5%。麻栎林地表径流量占总产流量的 61.8%,荒草地地表径流量占总产流量的 81.1%,说明麻栎林和荒草地的产流都以地表径流为主。麻栎林和荒草地的壤中流量占总产流量比例分别是 37.2% 和 18.9%,麻栎林的大于荒草地的,说明麻栎林与荒草地相比,可以促进降雨下渗,增加壤中流,减少地表径流的流失。由图 3 还可看出,壤中流的产流历时长于地表径流的,这是由于在降雨停止初期,地表径流产流停止,由于地表积水及土壤水分含量较大,壤中流依然保持着稳定的状态,随着降雨停止且缺乏后续降雨补充,壤中流的产流量逐渐减少。

通过对麻栎林和荒草地地表径流和壤中流随时间变化过程进行回归分析,得到关于地表径流量和壤中流量与降雨时间的函数关系方程,可用来模拟径流随时间的变化过程,其中地表径流量与降雨时间呈较好的对数函数关系,这与唐柄哲[27]研究结果相一致。

麻栎林地表径流量:$y=839.63\ln(x)+321.15$, $R^2=0.781$

荒草地地表径流量:$y=1006.1\ln(x)+625.45$, $R^2=0.7071$

麻栎林壤中流量:$y=0.0514x^3-2.0952x^2+22.968x+47.461$, $R^2=0.9565$

荒草地壤中流量:$y=0.0496x^3-2.0126x^2+22.659x-9.0999$, $R^2=0.9288$

式中,x 为降雨时间(min),y 为径流量(ml/min)。

2.2 麻栎林和荒草地的径流氮素流失及其动态变化特征

2.2.1 地表径流全氮迁移特征

从图 4 及表 4 看出,麻栎林和荒草地地表径流全氮输出浓度在初期均较高,分别为 16.6 mg/L 和 17.6 mg/L,随着降雨的进行,二者的地表径流全氮输出浓度逐渐减少并逐渐趋于稳定。Forsyth 等[28]在昆士兰东南沿海地区研究发现,全氮浓度在地块初始径流中最高,一般随时间增加而减少。Wu 等[16]通过模拟降雨研究发现,全氮全磷的流失量随时间的增加而减小,这都与本研究结果相似。但麻栎林和荒草地二者输出浓度过程又有一些不同,麻栎林地表径流全氮输出浓度在前期减少剧烈,在第 10 min 时,麻栎林地表径流全氮浓度约为初期的 87.5%左右,随着降雨的继续,在第 20 min 时,为初期的 75%左右,并逐渐保持稳定直至降雨结束。荒草地的地表径流全氮输出浓度初期浓度较高,随着降雨过程逐渐降低,在第 30 min 时,其浓度逐渐稳定,约为初期的 88%左右,直至降雨结束。其原因为,在降雨开始地表径流产生初期时,土壤表层的氮元素相对富集,随着地表径流的产生,氮元素随地表径流进行迁移,含量减少,地表径流与土壤表层的氮元素的交换达到平衡状态,全氮随地表径流的迁移达到稳定状态。麻栎林和荒草地地表径流全氮输出平均浓度分别为 13.1 mg/L 和 15.2 mg/L,麻栎林比荒草地低 13.8%,麻栎林地表径流全氮流失量是荒草地的 52.9%,这是由于麻栎林地表植被覆盖大于荒草地的,有效地拦截和阻止的地表径流中氮素的流失。说明麻栎林能够更好的保持土壤中的氮元素。而王国重等[4]在豫西南山区通过模拟降雨研究发现,乔木林的平均全氮流失量是荒草地的 87.7%,乔木林的平均全氮流失量低于荒草地的。吕婷等人[5]在长兴县通过自然降雨研究发现,林地(人工林)与荒地中地表径流液态全氮的流失通量分别为 1.59 kg hm^{-2} a^{-1}与 3.99 kg hm^{-2} a^{-1},荒地中地表径流全氮流失大于林地的。Suescún 等[29]在安第斯山脉的研究发现,在 52 周的监测中,牧场的地表径流量是林地的

3 倍,流失的营养物质,包括 Ca^{2+},Mg^{2+},K^{+},PO_4^{3-}以及 NO_3^{-},牧场的流失量均高于林地的,这都与本研究中麻栎林的全氮流失小于荒草地的结论相一致。

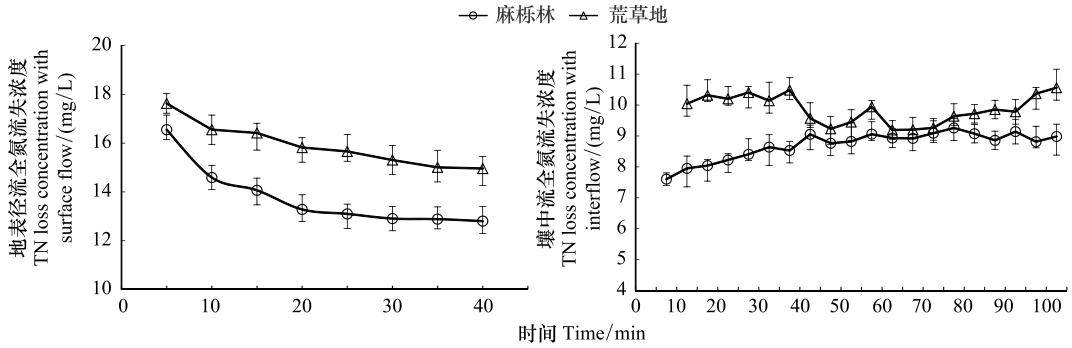


图 4　麻栎林与荒草地地表径流与壤中流全氮流失特征

Fig.4　Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Q. acutissima* forest and grassland

表 4　麻栎林和荒草地全氮流失特征

Table 4　Characteristics of nitrogen loss in *Q. acutissima* forest and grassland

样地 Sample area	径流类型 Runoff type	样地 1 Sample area 1 径流量 Runoff volume/L	全氮流失量 TN loss/mg	占比 Ratio/%	全氮平均浓度 TN average concentration/(mg/L)	样地 2 Sample area 2 径流量 Runoff volume/L	全氮流失量 TN loss/mg	占比 Ratio/%	全氮平均浓度 TN average concentration/(mg/L)
麻栎林地	地表径流	9.2	127.4	70.7	13.8	9.8	127.2	70.4	13.0
Q. acutissima	壤中流	5.8	52.9	29.3	9.1	5.9	53.5	29.6	9.1
	总产流	15.0	180.3	-	12.0	15.7	180.7	-	11.5
荒草地 Grassland	地表径流	15.5	240.6	87.1	15.5	15.6	240.1	87.1	15.4
	壤中流	3.3	35.5	12.9	10.8	3.9	35.6	12.9	9.1
	总产流	18.8	276.1	-	14.7	19.5	275.7	-	14.1

样地 Sample area	径流类型 Runoff type	样地 3 Sample area 3 径流量 Runoff volume/L	全氮流失量 TN loss/mg	占比 Ratio/%	全氮平均浓度 TN average concentration/(mg/L)	样地平均值 Sample average 径流量 Runoff volume/L	全氮流失量 TN loss/mg	占比 Ratio/%	全氮平均浓度 TN average concentration/(mg/L)
麻栎林地	地表径流	10.1	126.7	70.2	12.5	9.7	127.1	70.4	13.1
Q. acutissima	壤中流	6.3	53.8	29.8	8.5	6	53.4	29.6	8.9
	总产流	16.4	180.5	-	11.0	15.7	180.5	-	11.5
荒草地 Grassland	地表径流	16.2	239.9	86.8	14.8	15.8	240.2	87.0	15.2
	壤中流	4.0	36.6	13.2	9.2	3.7	35.9	13.0	9.7
	总产流	20.2	276.5	-	13.7	19.5	276.1	-	14.2

通过对麻栎林和荒草地地表径流全氮流失浓度随时间变化过程进行回归分析,发现地表径流全氮流失浓度与降雨时间呈较好的幂函数关系,即随时间变化的地表径流全氮流失浓度可以通过幂函数来模拟,这与王茹[30]研究结果相一致。

麻栎林:$y = 17.884x^{-0.165}$,$R^2 = 0.9221$

荒草地:$y = 18.89x^{-0.108}$,$R^2 = 0.982$

式中,x 为降雨时间(min),y 为全氮流失浓度(mg/L)。

2.2.2　壤中流全氮迁移特征

由图 4 和表 4 看出,在整个壤中流产流过程中,麻栎林和荒草地的壤中流全氮输出浓度一直处于一个相

对稳定的状态,荒草地壤中流全氮输出浓度在 10 mg/L 上下波动,麻栎林的在 7—10 mg/L 之间波动,波动起伏变化比较小。造成这种现象的原因主要是因为麻栎林和荒草地的壤中流流速比较缓慢,流速波动较小,使雨水在下渗过程中所产生的壤中流与土壤中的氮元素交换作用达到一种平衡,氮元素的流失量相对比较稳定。周林飞等[3]在辽宁浑河流域研究发现,耕地与草地壤中流中总氮的浓度在整个径流过程中呈波浪状输出,总体趋势相对稳定,无较大的起伏变化,与本研究结果相似。麻栎林的壤中流全氮输出浓度平均值为 8.9 mg/L,而荒草地的为 9.7 mg/L,麻栎林的比荒草地的低 8.2%,且在整个产流过程中,荒草地的壤中流全氮输出浓度始终高于麻栎林的,这是由于麻栎林土壤中植物根系和枯落物较多,可以有效吸收拦截随壤中流迁移的氮元素,减少麻栎林中氮元素的流失浓度。常龙飞等[31]在巢湖低山丘陵地区对 6 种主要土地利用类型(弃耕地、尾矿裸地、灌木林地、荒草地、马尾松林地和人工恢复林地)进行研究,壤中流全氮流失浓度按大小排序依次为尾矿裸地>荒草地>次生马尾松林地>灌木林地>弃耕地>人工恢复林地,发现荒草地的壤中流全氮流失浓度大于马尾松林地和人工恢复林地的,这与本研究中荒草地的壤中流全氮输出浓度高于麻栎林的的结论相类似。

通过对麻栎林和荒草地壤中流全氮流失浓度随时间变化过程进行回归分析,得到关于壤中流全氮流失浓度与降雨时间的函数关系方程,可用来模拟壤中流全氮流失浓度随时间的变化过程:

麻栎林:$y=0.0002x^3-0.0136x^2+0.2939x+7.1068$, $R^2=0.9262$

荒草地:$y=-0.0002x^4+0.0096x^3-0.1746x^2+1.118x+8.0246$, $R^2=0.746$

式中:x 为降雨时间(min),y 为全氮流失浓度(mg/L)。

2.2.3 地表径流和壤中流全氮迁移比例分析

由表 4 和图 5 看出,麻栎林和荒草地的地表径流全氮输出浓度均高于壤中流的,并且麻栎林的全氮总流失浓度比荒草地的低 19.0%,其中,麻栎林的地表径流全氮流失量占全氮总流失量的 70.4%,壤中流占 29.6%;荒草地的地表径流全氮流失量占全氮总流失量的 87.0%,壤中流占 13.0%;荒草地径流全氮流失量是麻栎林的 1.9 倍。说明与壤中流相比,荒草地的地表径流迁移而造成的全氮流失是主要的流失方式。同时,地表径流全氮输出浓度始终高于壤中流的,也说明土壤垂直方向上,全氮的流失浓度由上到下减少,说明全氮的流失受土壤虑减机制的影响,减少通过下渗进入地下水,减少全氮的流失量,避免地下水被氮元素污染。可见,通过植被恢复,促进地表径流下渗,减少地表径流量,能够有效减少氮素的流失。

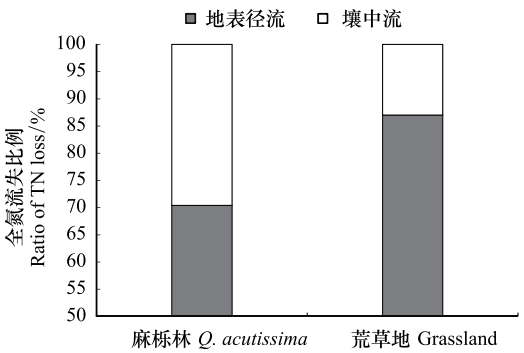


图 5 麻栎林与荒草地全氮流失比例

Fig. 5 The ratio of total nitrogen loss in *Q. acutissima* forest and grassland

3 结论

(1)麻栎林的总产流量、地表径流量、壤中流量分别是荒草地的 80.5%、61.4%、162.2%,麻栎林的总产流量与地表径流量均小于荒草地,但壤中流量高于荒草地的。地表径流产流过程呈现不断增加且趋于稳定的特征;壤中流产流时间滞后于地表径流的,产流过程流量波动比较小,保持相对稳定。地表径流量和壤中流量随降雨时间的变化过程可分别通过对数函数和多项式函数进行模拟。

(2)麻栎林的全氮总流失浓度、地表径流全氮流失浓度、壤中流全氮流失浓度为 11.5、13.1、8.9 mg/L,分别比荒草地低 19.0%、13.8%、8.2%。地表径流全氮流失浓度一般前期较大,而后递减,至后期趋于稳定;壤中流全氮流失浓度在整个产流过程中保持相对稳定。地表径流和壤中流全氮流失浓度随降雨时间的变化过程可分别通过幂函数和多项式函数进行模拟。

(3)在整个降雨产流过程中,麻栎地表径流量占总产流量的 61.8%,荒草地地表径流量占总产流量的 81.1%,麻栎地表径流全氮流失量占总流失量的 70.4%,荒草地地表径流全氮流失量占总流失量的 87.0%,径流、氮素的流失都以地表径流为主,土壤滤减机制明显。可见,通过植被恢复,促进地表径流下渗,减少地表径流的流失量,能够有效减少氮素的流失。与荒草地相比,麻栎林具有明显增加壤中流、减少地表径流和氮素流失效果。

参考文献(References):

[1] 孟红旗, 赵同谦. 降雨侵蚀力对河岸滩区耕地土壤养分流失的影响. 水土保持通报, 2009, 29(1): 28-31.

[2] Lewis W M Jr. Nitrogen and phosphorus runoff losses from a nutrient-poor tropical moist forest. Ecology, 1986, 67(5): 1275-1282.

[3] 周林飞, 郝利朋, 孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征. 生态环境学报, 2011, 20(4): 737-742.

[4] 王国重, 李中原, 田颖超, 屈建钢, 徐建昭, 刘占欣. 雨强和土地利用对豫西南山区氮磷流失的影响. 人民长江, 2016, 47(7): 18-22.

[5] 吕婷, 廖敏, 叶照金, 方至萍, 黄小辉, 张云, 施海龙, 沈杰. 长兴县合溪水库集水区不同土地利用方式下径流氮流失特征研究. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1369-1377.

[6] 王萍. 拦截草带对坡耕地水土流失及氮磷输出的控制作用研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2011.

[7] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 张鹏宇, 柴晶. 植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.

[8] Choi K S, Lee S G, Jang J R. Vegetative filter strip (Vfs) applications for runoff and pollution management in the Saemangeum Area of Korea. Irrigation and Drainage, 2016, 65(S2): 168-174.

[9] 马东, 杜志勇, 吴娟, 周震峰, 史衍玺. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征. 水土保持学报, 2011, 25(6): 31-33, 39-39.

[10] 唐佐芯. 不同措施对坡地产流产沙和氮磷迁移的控制作用研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2012.

[11] 储双双, 刘颂颂, 韩博, 莫罗坚, 王向前, 曾曙才. 华南不同林地地表径流量及氮、磷流失特征. 水土保持学报, 2013, 27(5): 99-104, 114-114.

[12] 马骞, 于兴修, 刘前进, 吕国安, 张含玉. 沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1526-1536.

[13] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, Jiang H, Xu Z X. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180-191.

[14] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 张彪, 朱晓明, 刘德富. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.

[15] 胡雪琴, 蒋平, 彭旭东, 史东梅. 紫色丘陵区不同土地利用类型径流泥沙及氮磷流失特征. 水土保持学报, 2015, 29(2): 35-39.

[16] Wu X Y, Zhang L P, Yu X X. Impacts of surface runoff and sediment on nitrogen and phosphorus loss in red soil region of southern China. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7): 1939-1949.

[17] 张梦娇, 王震洪. 模拟地表径流冲刷下大冲流域不同土地利用类型地表氮和磷流失特征. 农业与技术, 2012, 32(2): 3-6.

[18] 庹刚, 李恒鹏, 金洋, 李燕. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征. 湖泊科学, 2009, 21(1): 45-52.

[19] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[20] Mardamootoo T, Preez C C D, Sharpley A N. Phosphorus mobilization from sugarcane soils in the tropical environment of Mauritius under simulated rainfall. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 103(1): 29-43.

[21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 28-35.

[22] 陈晓冰, 王克勤. 不同竹林地氮磷径流流失特征研究. 林业资源管理, 2012, (6): 105-111.

[23] 陈安磊, 王卫, 张文钊, 王飞, 尹春梅, 李雁勇, 魏文学, 谢小立. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 101-106.

[24] Hosseini M, Geissen V, González-Pelayo O, Serpa D, Machado A I, Ritsema C, Keizer J J. Effects of fire occurrence and recurrence on nitrogen and phosphorus losses by overland flow in maritime pine plantations in north-central Portugal. Geoderma, 2017, 289: 97-106.

[25] 沈紫燕. 几种关键因素对红壤中溴、磷随径流迁移机制的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.

[26] 杜祥运, 梁永哲, 夏振尧, 夏栋, 许文年, 王英琨. 碎石土坡地不同植被配置下的养分流失途径. 水土保持学报, 2017, 31(1): 61-67.

[27] 唐柄哲. 不同施肥类型及耕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.

[28] Forsyth A R, Bubb K A, Cox M E. Sediment and nutrient losses from exotic *Pinus* plantation management operations under simulated rainfall. Australian Forestry, 2006, 69(1): 58-67.

[29] Suescún D, Villegas J C, León J D, Flórez C P, García-Leoz V, Correa-Londoño G A. Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. Regional Environmental Change, 2017, 17(3): 827-839.

[30] 王茹. 不同坡度条件下紫色土坡面土壤侵蚀特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.

[31] 常龙飞, 王晓龙, 李恒鹏, 胡锋. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 511-517.