

# 退耕林地麻栎刺槐林壤中流及其磷素流失特征

王荣嘉, 高鹏, 李成, 董学德, 姜尧琨, 王俊茜

(山东农业大学林学院, 山东泰山森林生态系统国家定位观测研究站,  
山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 山东 泰安 271018)

**摘要:** 为研究退耕还林后林地对壤中流磷素的调控效果, 探究雨强对壤中流磷素流失的影响, 选取鲁中南山区典型麻栎林、刺槐林和麻栎—刺槐混交林为研究对象, 以荒草地为对照, 采用模拟降雨试验方法, 研究林地壤中流及磷素流失特征。结果表明: (1) 林地壤中流占总产流的 36.16%~46.93%, 荒草地壤中流比例为 18.58%, 林地雨水下渗能力高于荒草地的, 其中麻栎—刺槐混交林雨水下渗能力最好。随着雨强的增大, 林地壤中流比例由 54.34% 减小到 37.62%。(2) 林地壤中流 TP 流失量低于荒草地的, 为荒草地的 45.88%~63.25%。林地 TP 总流失量比荒草地少 55.32%~77.43%, 与荒草地相比, 林地对磷素的调控效果更优, 其中麻栎—刺槐混交林的调控效果最好。随雨强的增大, 林地壤中流 TP 流失量增加了 0.68~1.33 倍。(3) 林地和荒草地的壤中流 TP 流失量占 TP 总流失量的 12.12%~25.00%, 壤中流 TP 流失在 TP 总流失中占据一定比例, 在磷素流失中不容忽视。随着雨强增加, 林地壤中流 TP 流失比例由 30.66% 下降到 10.62%。研究成果对探究林地壤中流磷素流失规律和改善生态环境具有重要参考价值。

**关键词:** 退耕还林; 麻栎刺槐林; 模拟降雨; 壤中流; 磷素流失

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0009-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.002

## Characteristics of Subsurface Runoff and Phosphorus Loss in *Quercus Acutissima* and *Robinia Pseudoacacia* Forest in the Grain to Green Program

WANG Rongjia, GAO Peng, LI Cheng, DONG Xuede, JIANG Yaokun, WANG Junxi

(Forestry College of Shandong Agricultural University, Shandong Mountain

Tai Forest Ecosystem National Positioning Observation Research Station, Shandong

Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Tai'an, Shandong 271018)

**Abstract:** In order to study the effects of forest land and rain intensities on the phosphorus loss regulation in subsurface runoff, the typical *Quercus acutissima* forest, *Robinia pseudoacacia* forest and *Quercus acutissima-Robinia pseudoacacia* mixed forest in hilly area of middle southern Shandong Province were selected as the research objects. And simulated artificial rainfall experiments were carried out. The results showed that: (1) Subsurface runoff accounted for 36.16%~46.93% of the total runoff in forest, and for 18.58% in grassland. The rainwater infiltration capacity was higher in forest land than that in grassland, and the mixed forest gave the highest rainfall infiltration capacity. With the increase of rainfall intensities, the proportions of subsurface runoff decreased from 54.34% to 37.62% in forest. (2) TP losses with subsurface runoff in forest were only 45.88%~63.25% of those in grassland. Total TP losses in forest land were 55.32%~77.43% lower than those of grassland. Compared with grassland, the control effect of phosphorus in forest land was better, especially for the mixed forest, which gave the best control effect on phosphorus loss. With the increase of rainfall intensities, TP losses with subsurface runoff in forest increased by 0.68 times to 1.33 times. (3) TP losses with subsurface runoff accounts for 12.12%~25.00% of the total TP losses in forest and grassland. TP losses in subsurface runoff occupied the certain proportions of the total TP losses, so the subsurface runoff could not be ignored in TP loss control. With the increase of rainfall intensities, the proportions of TP losses with subsurface runoff decreased from 30.66% to 10.62% in forest. These findings could provide important reference for phosphorus loss control in forestland and the improvement of ecological environment.

收稿日期: 2018-07-28

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2016CM49); 国家林业公益性行业专项(2014303-08)

第一作者: 王荣嘉(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与修复研究。E-mail: 18763821883@163.com

通信作者: 高鹏(1967—), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事水土保持生态修复和土壤生态研究。E-mail: gaopengy@163.com

**Keywords:** the Grain to Green Program; *Quercus acutissima*-*Robinia pseudoacacia* forest; simulated rainfall; subsurface runoff; phosphorus loss

土壤中氮磷等元素能随降雨产生的壤中流和地表径流迁移进入水体,引起水体富营养化<sup>[1]</sup>,破坏生态环境,其中磷素是造成水体富营养化的主要限制性因素<sup>[2]</sup>。已有研究<sup>[3]</sup>发现,壤中流和地表径流磷素流失特征差异显著,壤中流磷素流失对导致水体富营养化的作用不容忽视。目前,国内外学者进行了许多壤中流磷素流失相关研究。何淑勤等<sup>[4]</sup>在紫色土坡耕地针对不同耕作方式进行研究,发现横坡垄作中壤中流全磷(TP)流失量最大,分别是平作和顺坡垄作的3.2,3.1倍。常龙飞等<sup>[5]</sup>在巢湖地区研究发现,在0—20 cm的土层壤中流中,弃耕地TP浓度为0.34 mg/L,高于次生马尾松林地、灌木林地和人工恢复林地。Mcdowell<sup>[6]</sup>研究了通过使用硫酸铝对草地壤中流磷素流失影响,发现当硫酸铝的使用量为50 kg/hm<sup>2</sup>时,可以减少26%的磷素流失。Bender等<sup>[7]</sup>研究发现,汇入流域的溶解态磷以壤中流为主。

但目前针对壤中流磷素流失的研究大多集中在坡耕地,有关林地壤中流磷素流失的研究鲜见报道。退耕还林工程是世界上最大的森林生态建设项目,能够有效减少土壤磷素随壤中流的流失,然而目前尚缺乏针对林地尤其是退耕林地壤中流磷素迁移、转化特征及壤中流所携带磷素输移负荷比例等问题的研究,难以回答退耕还林对磷素的调控效果等问题。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、刺槐林以及麻栎—刺槐混交林为研究对象,以荒草地为对照。通过模拟降雨试验,研究不同林地与荒草地的壤中流磷素流失特征,探讨不同林地壤中流磷素输移负荷比例,不仅可以为鲁中南山区退耕还林后林地壤中流磷素流失规律研究提供科学依据,而且对从源头控制水体富营养化和改善生态环境也具有重要参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在山东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药乡小流域,地处北方土石山区鲁中南山区丘陵区西北部,其所属一级流域为黄河流域,支流为大

汶河。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3 821℃,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,主要乔木有麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、赤松(*Pinus densiflora* Sieb.)等;灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、君迁子(*Diospyros lotus* 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 本研究在泰山森林生态系统国家定位观测研究站进行,该站位于山东省泰安市药乡小流域,地处北方土石山区鲁中南山区丘陵区西北部。麻栎与刺槐是该地区典型林分,选择该流域麻栎林、刺槐林以及麻栎—刺槐混交林进行观测试验,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、刺槐林以及麻栎—刺槐混交林作为研究对象,选择3种林分及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,每个样地大小为1.5 m×2.0 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,参考钱婧<sup>[8]</sup>、Mardamootoo等<sup>[9]</sup>取土方法,尽可能使地表植被和土层不被破坏,将地表植被、枯落物层以及土层进行分开和分层(每10 cm土层取1次土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天左右),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,并使地表植被覆盖接近原地貌植被覆盖,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 标准地基本情况

样地类型	土壤类型	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	沙粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	平均坡度/(°)	降雨前含水量/%	地表植被盖度/%	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
麻栎林	棕壤	40	1.15	49.28	64.30	32.44	3.26	34.2	0.30	16	15.9	50	825
刺槐林	棕壤	40	1.12	49.88	65.68	33.50	3.82	34.3	0.32	16	16.4	58	633
麻栎—刺槐混交林	棕壤	40	1.09	52.28	66.30	31.44	2.26	34.5	0.35	16	16.8	68	850
荒草地	棕壤	40	1.48	41.26	59.34	36.73	3.93	32.9	0.27	16	13.5	35	

注:粒径分级标准采用美国农业部制。

1.2.2 模拟降雨试验 模拟降雨试验采用南京南林电子科技有限公司研制 NLJY-10 人工模拟降雨系统,具体参数见表 2。为研究林地(麻栎林、刺槐林以及麻栎—刺槐混交林)及荒草地的壤中流及磷素流失特征,根据泰安当地近 30 年降雨资料,考虑到该区暴雨历时短、强度大等特点,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。

表 2 NLJY-10 人工模拟降雨系统参数

指标	参数
有效降雨面积/m	$1.5 \times 2.0$
降雨高度/m	3
雨强连续变化范围/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	30~150
降雨均匀度系数	>0.86
雨滴大小调控范围/mm	1.7~5.0
降雨调节精度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	7
降雨测量精度/( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	0.01

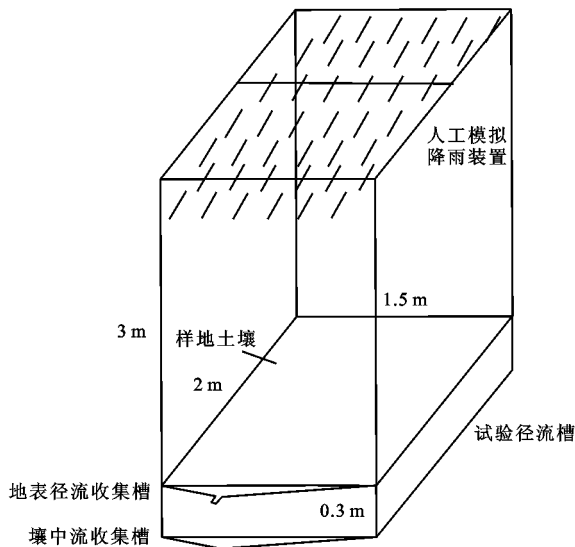


图 1 试验装置示意

同时为探究雨强对林地壤中流及其磷素流失的影响,根据泰安当地近 30 年降雨资料,对麻栎—刺槐混交林采用重现期为 1 年的雨强 50 mm/h(小雨强)、重现期为 2.5 年的雨强 75 mm/h(中雨强)和重现期为 4 年的雨强 100 mm/h(大雨强)3 种雨强进行模拟试验。

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  $14^{\circ} \sim 18^{\circ}$ ,因此,径流槽倾斜坡度确定为  $16^{\circ}$ ,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,模拟降雨进行 3 次平行降雨试验。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 1 次地表径流和壤中流,并记录采样径流量,用于计算不同时刻的径流量。由于壤中流降雨结束后产流不停止,于降雨停止后采样 60 min,用于研究壤中流相关特征。

### 1.3 样品分析方法及数据分析

水样采集后加酸保存并带到山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室进行测定分析。水样全磷(TP)测定采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法<sup>[10]</sup>。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<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据处理

文中数据、图表使用 Excel 2007 软件进行处理分析,并用 SPSS 19.0 软件进行 LSD 显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林地与荒草地壤中流产流特征

由表 3 可知,林地与荒草地壤中流的产流时间均滞后于地表径流的。这可能因为降雨前期,土壤含水量未饱和,降雨到达地表后一部分由于土壤孔隙无法下渗而形成超渗产流,产生地表径流,一部分填充土壤孔隙,提高土壤含水量,当土壤含水量达到饱和状态,壤中流才开始产流,因此壤中流产流时间滞后于地表径流的。麻栎林、刺槐林、麻栎—刺槐混交林与荒草地的壤中流量分别占总产流的 36.16%,40.13%,46.93%,18.58%,林地壤中流比例高于荒草地的。这是因为林地的植被覆盖(50%~68%)高于荒草地(35%),地表植被具有拦蓄地表径流、促进下渗、增加壤中流的功能;同时林地的植物根系较多,使林地土壤孔隙度大于荒草地的,土壤容重小于荒草地的,有利于雨水下渗,减少径流流失<sup>[11]</sup>。因此林地的雨水下渗能力高于荒草地的,其壤中流比例也高于荒草地的。林地中麻栎—刺槐混交林孔隙度最大,土壤容重最小,其雨水下渗能力最好。郑海金等<sup>[12]</sup>通过模拟降雨研究发现,在不考虑延续径流量时,3 种雨强下壤中流占总径流量的 16.34%~44.22%,与本研究相一致,在考虑延续径流量时,壤中流占总径流量的 52.26%~67.19%,与本研究有所差异,这可能因为郑海金等<sup>[12]</sup>延续径流量接管时间较长,有的延时达 20.5 h,而本研究中延时 1 h,远低于郑海金等<sup>[12]</sup>的试验,故导致试验结果有所差异。

### 2.2 不同林地与荒草地的壤中流 TP 流失及其动态变化特征

2.2.1 壤中流 TP 流失特征与输移机制 由图 2 可知,林地与荒草地壤中流 TP 浓度在产流过程中呈动态平衡。这主要是因为壤中流是在土壤含水量饱和后产流的,土壤内部物理结构复杂,使雨水在下渗过程中所产生的壤中流与土壤中的磷素交换作用达到一种动态平衡。周林飞等<sup>[13]</sup>在辽宁浑河流域研究发现,草地壤中流 TP 浓度在整个径流过程中呈波浪状输出,总体趋势相对稳定,与本研究结果相似。林地壤中流 TP 流失量与 TP 浓度均低于荒草地的,麻栎林、刺槐林以及麻栎—刺槐混交林 TP 流失量分别为

荒草地的 63.25%, 45.88%, 46.55%。林地 TP 总流失量比荒草地少 55.32%~77.43%, 与荒草地相比, 林地对磷素的调控效果更优, 其中麻栎—刺槐混交林的调控效果最好。这是因为林地植被覆盖较高, 土壤

中植物根系较多, 可以拦截吸收随壤中流迁移的 TP, 减少 TP 流失。常龙飞等<sup>[5]</sup>通过径流小区研究发现, 在 0—20, 20—40 cm 土层中, 荒草地的 TP 浓度均高于灌木林地和人工恢复林地。

表 3 不同林地及荒草地产流及磷素流失特征

样地类型	径流类型	产流时间/min	径流量/L	径流量/比例/%	TP 流失量/mg	TP 流失比例/%	TP 平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
麻栎林	壤中流	8.3	28.66a	36.16	5.68a	17.14	0.20a
	地表径流	2.8	50.59A	63.84	27.44A	82.86	0.54A
	总产流		79.25		33.12		0.42
刺槐林	壤中流	7.9	31.60b	40.13	4.12b	15.43	0.13b
	地表径流	3.2	47.14B	59.87	22.56B	84.57	0.48B
	总产流		78.73		26.67		0.34
麻栎—刺槐混交林	壤中流	9.6	31.60b	46.93	4.18b	25.00	0.13b
	地表径流	1.2	35.73C	53.07	12.55C	75.00	0.35C
	总产流		67.33		16.73		0.25
荒草地	壤中流	10.4	17.53c	18.58	8.98c	12.12	0.51c
	地表径流	0.7	76.82D	81.42	65.14D	87.88	0.85D
	总产流		94.35		74.13		0.79

注: 表中同列不同大(小)写字母表示不同样地类型间地表径流(壤中流)差异显著( $p < 0.05$ )。

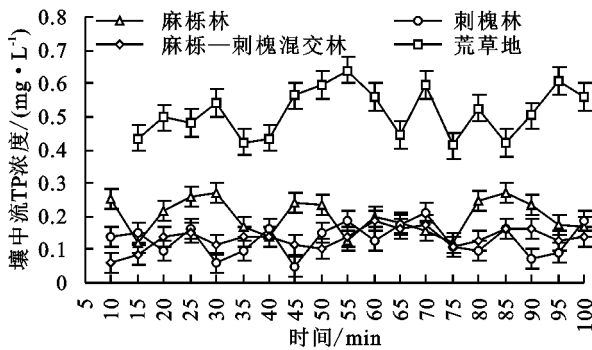


图 2 不同林地与荒草地壤中流 TP 流失特征

2.2.2 壤中流与地表径流 TP 比例分析 由表 3 和图 3 可知, 麻栎林、刺槐林、麻栎—刺槐混交林和荒草地的壤中流 TP 流失比例分别为 17.14%, 15.43%, 25.00%, 12.12%, 壤中流 TP 流失量在 TP 总流失量中占据一定比例, 在磷素流失中不容忽视。这是因为一般来说, 草地和林地径流中的磷以溶解态磷为主<sup>[14]</sup>, 壤中流量在总径流中占据相当比例(18.58%~46.93%), 使壤中流 TP 流失量在 TP 总流失量中占据一定比例, 不能被忽略。周林飞等<sup>[13]</sup>在浑河地区研究发现, 草地壤中流磷素流失量占总流失量的 9%, 与本研究中荒草地壤中流磷素流失量占比(12.12%)相接近。

## 2.3 不同雨强下壤中流 TP 流失及其动态变化特征

2.3.1 雨强对林地壤中流产流的影响 由表 4 可知, 林地中小雨强的总产流量最少, 仅为中雨强和大雨强的 55.49% 和 33.10%, 同时, 随着雨强的增大, 林地壤中流量增加了 0.56~1.09 倍, 比例由 54.34% 减小到 37.62%。这是因为雨强越大, 到达地面的雨量越多, 使壤中流量增加, 但雨滴对地表的击打作用增强, 形成溅蚀, 堵塞土壤孔隙, 影响雨水下渗, 减少壤中流比

例。陈玲等<sup>[15]</sup>通过模拟降雨试验研究发现, 中雨强(75 mm/h)下壤中流占总径流 25.5%, 而大雨强(132 mm/h)下则为 8.9%, 随着雨强增大, 壤中流比例减少, 与本研究相一致。

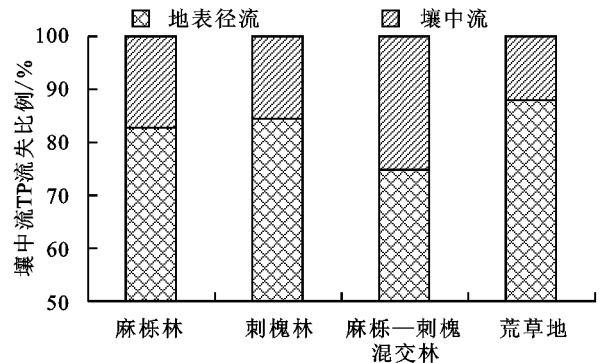


图 3 林地与荒草地 TP 流失比例

2.3.2 雨强对 TP 流失特征的影响 由图 4 可知, 3 种雨强下林地壤中流 TP 浓度在产流过程中呈动态平衡。小雨强、中雨强和大雨强的壤中流 TP 平均浓度分别为 0.12, 0.13, 0.14 mg/L, 虽然 TP 浓度随雨强增大而增大, 但三者差异并不显著(表 4)。随雨强的增大, TP 流失量增加了 0.68~1.33 倍。这是因为虽然雨强增大, 壤中流增大, 冲刷能力增强, 使随壤中流迁移的 TP 流失量增大。此外, TP 流失量与径流量呈显著正相关<sup>[16]</sup>, 雨强增大, 径流量增大, 也会使 TP 流失量增加。同时由于径流量增大, 稀释了 TP 浓度, 使 TP 浓度无显著变化。郑海金等<sup>[12]</sup>在红壤区研究发现, 随着雨强的增大, TP 浓度由 0.02 mg/L 增加到 0.12 mg/L, TP 流失量也随雨强增大而增大。陈玲等<sup>[15]</sup>通过模拟试验发现, 大雨强(132 mm/h)的壤中流 TP 浓度为 0.78 mg/L, 大于中雨强(75 mm/h)的 TP 浓度。

冯勇<sup>[17]</sup>通过模拟试验发现,在雨强为 36,67,96 mm/h 时,壤中流的 TP 流失量分别为 0.21,0.40,0.67

mg,即随着雨强的增加,壤中流 TP 流失量随之增加,这与本研究结果相一致。

表 4 不同雨强下林地产生流及磷素流失特征

雨强	径流类型	产流时间/min	径流量/L	径流比例/%	TP 流失量/mg	TP 流失比例/%	TP 平均浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
小雨强	壤中流	16.5	20.30a	54.34	2.49a	30.66	0.12a
	地表径流	1.5	17.06A	45.66	5.63A	69.34	0.33A
	总产流		37.36		8.12		0.22
中雨强	壤中流	9.6	31.60b	46.93	4.18b	25.00	0.13a
	地表径流	1.2	35.73B	53.07	12.55B	75.00	0.35A
	总产流		67.33		16.73		0.25
大雨强	壤中流	7.0	42.45c	37.62	5.81c	10.62	0.14a
	地表径流	0.5	70.40C	62.38	48.85C	89.38	0.69B
	总产流		112.85		54.66		0.48

注:表中同列不同大(小)写字母表示不同雨强间地表径流(壤中流)差异显著( $p < 0.05$ )。

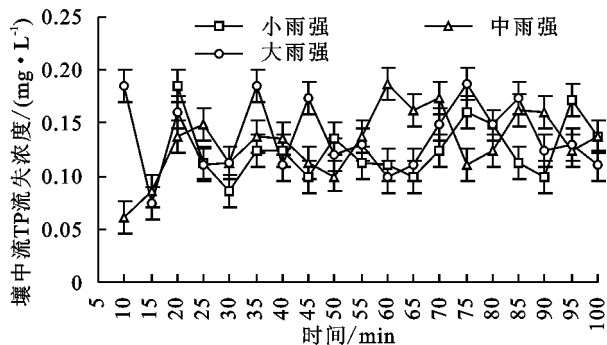


图 4 不同雨强下壤中流 TP 流失特征

2.3.3 雨强对 TP 流失比例的影响 由表 4 可知,在林地 3 种雨强中,随着雨强增加,壤中流 TP 流失比例由 30.66% 下降到 10.62%。这是因为 TP 流失一般与径流量呈正相关<sup>[16]</sup>,随着雨强增大,壤中流量比例减小,使壤中流 TP 流失比例减小。陈玲等<sup>[15]</sup>研究发现,随雨强增大,TP 随壤中流流失比例由 9.00% 下降到 1.64%。徐国策等<sup>[18]</sup>通过模拟降雨发现,随着雨强由 64.2 mm/h 上升到 120 mm/h,壤中流 TP 流失比例由 7.1% 下降到 4.2%。这都与本研究结果相类似。

### 3 结论

(1) 林地壤中流占总产流的 36.16%~46.93%, 荒草地壤中流比例为 18.58%, 林地雨水下渗能力高于荒草地的, 其中麻栎—刺槐混交林雨水下渗能力最好。随着雨强的增大, 林地壤中流比例由 54.34% 减小到 37.62%。

(2) 林地及荒草地壤中流 TP 浓度在产流过程中呈动态平衡。麻栎林、刺槐林及麻栎—刺槐混交林壤中流 TP 流失量分别为荒草地的 63.25%, 45.88%, 46.55%。林地 TP 总流失量比荒草地少 55.32%~77.43%, 与荒草地相比, 林地对磷素的调控效果更优, 其中麻栎—刺槐混交林的调控效果最好。随雨强的增大, 林地壤中流 TP 流失量增加了 0.68~1.33 倍。

(3) 麻栎林、刺槐林、麻栎—刺槐混交林和荒草地

的壤中流 TP 流失比例分别为 17.14%, 15.43%, 25.00%, 12.12%, 壤中流 TP 流失量在 TP 总流失量中占据一定比例, 在磷素流失中不容忽视。随着雨强增加, 林地壤中流 TP 流失比例由 30.66% 下降到 10.62%。

#### 参考文献:

- [1] 刘俏, 张丽萍, 胡响明, 等. 红壤丘陵区经济林地氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 185-190.
- [2] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.
- [3] 庾刚, 李恒鹏, 金洋, 等. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 45-52.
- [4] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成. 紫色土区坡耕地壤中流磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 20-24.
- [5] 常龙飞, 王晓龙, 李恒鹏, 等. 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[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 511-517.
- [6] McDowell R W. Treatment of pasture topsoil with alum to decrease phosphorus losses in subsurface drainage [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 207: 178-182.
- [7] Bender M A, Santos D R D, Tiecher T, et al. Phosphorus dynamics during storm events in a subtropical rural catchment in southern Brazil [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2018, 261: 93-102.
- [8] 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.
- [9] Mardamootoo T, Preez C C D, Sharpley A N. Phosphorus mobilization from sugarcane soils in the tropical environment of Mauritius under simulated rainfall [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 103(1): 29-43.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 28-35.
- [11] 沈奕彤. 模拟降雨条件下黑土坡面养分流失规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.

(下转第 19 页)

(2)对于 5°坡度的裸露小区,土壤侵蚀主要发生在 6—8 月,年土壤流失量为 1 388.2 t/(km<sup>2</sup>·a);对于 5°坡度的作物轮作小区,土壤侵蚀主要发生在 5—7 月,年土壤流失量为 166.7 t/(km<sup>2</sup>·a)。与裸露小区相比,轮作小区多年平均径流量减少 59.7%,土壤流失量减少 88.0%,说明大豆—红小豆轮作能有效防治坡面土壤侵蚀。

(3)大豆—红小豆轮作措施的多年平均 C 值为 0.12,其中大豆为 0.04,变化范围为 0.007~0.080,红小豆为 0.38,变化范围为 0.28~0.46。大豆和红小豆作物的 C 值月变化范围为 0.01~0.24 和 0.01~0.80,呈先减少后增加的变化趋势,其中 7—8 月 C 值较低,而 5,6,9 月 C 值较高。

#### 参考文献:

- [1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失与生态安全:东北黑土卷[M]. 北京:科学出版社,2010:57-80.
- [2] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志,2008,30(1):12-16,63.
- [3] 韩长赋. 加强东北黑土地保护,推进农业绿色发展[N]. 人民日报,2018-02-05(7).
- [4] 中华人民共和国农业部. 东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年). [EB/OL]. (2017-06-15) [2018-06-10]. [http://http://jiuban.moa.gov.cn/zwillm/tzgg/tz/201706/t20170623\\_5725947.html](http://http://jiuban.moa.gov.cn/zwillm/tzgg/tz/201706/t20170623_5725947.html).
- [5] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等. 辽西地区坡耕地垄膜沟耕对土壤侵蚀和作物产量的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(20):3904-3917.
- [6] 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.
- [7] 宋丽萍,罗珠珠,李玲玲,等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿—作物轮作对土壤物理性质的影响[J]. 草业学报,2015,24(7):12-20.
- [8] 杨宁,赵护兵,王朝辉,等. 豆科作物—小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系

[J]. 生态学报,2012,32(15):4827-4835.

- [9] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等. 保护性耕作条件下旱地农田麦豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报,2006,26(4):1176-1185.
- [10] 卢宗凡,张兴昌,苏敏,等. 陕北坡耕地轮作方式对水保效应的影响[J]. 西北农业学报,1993,2(2):81-84.
- [11] 张雪花,侯文志,王宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子 C 值的研究[J]. 农业环境科学学报,2006,25(3):797-801.
- [12] 吴限,魏永霞,王敏,等. 不同农田植被条件下黑土坡耕地产流和产沙特征[J]. 水土保持通报,2015,35(3):101-104,111.
- [13] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [J]. Agricultural Handbook, 1965, 282.
- [14] Preiti G, Romeo M, Bacchi M, Monti M. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems: Effects of rotation and tillage system on C-factor [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 85-93.
- [15] 胡良军,邵明安. 论水土流失研究中的植被覆盖度量指标[J]. 西北林学院学报,2001,16(1):40-43.
- [16] 于东升,史学正,吕喜玺. 低丘红壤区不同土地利用方式的 C 值及可持续性评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):72-77.
- [17] 刘燕玲,刘滨辉,王力刚,等. 黑龙江省降雨侵蚀力的变化规律[J]. 中国水土保持科学,2010,8(2):24-29.
- [18] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability: Proceedings of a workshop of the ISSS, Las Vegas (USA) [J]. Geoderma, 1986, 39(2): 158-159.
- [19] 张宪奎. 黑龙江省土壤流失方程应用简介[J]. 国土与自然资源研究,1995(1):30-32.
- [20] Gabriels D, Ghekiere G, Schiettecatte W, et al. Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 74(1): 47-53.

(上接第 13 页)

- [12] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. 水土保持学报,2014,28(6):41-45.
- [13] 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[J]. 生态环境学报,2011,20(4):737-742.
- [14] 狄霖. 苏北平原河网区农田养分含量分布与磷素流失规律研究[D]. 江苏扬州:扬州大学,2011.
- [15] 陈玲,刘德富,宋林旭,等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流

养分输出机制研究[J]. 环境科学,2013,34(6):2151-2158.

- [16] 彭梦玲,吴磊,乔闪闪. 不同雨强下黄土裸坡水—沙—氮磷流失耦合模拟[J]. 中国环境科学,2018,38(3):1109-1116.
- [17] 冯勇. 不同坡度和雨强条件下紫色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.
- [18] 徐国策,李鹏,成玉婷,等. 模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流磷素流失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(6):6-10.