

次降雨条件下鲁中南山区砂质壤土赤松林地产流与氮磷流失特征

周锐¹, 高鹏¹, 王荣嘉¹, 许景伟², 国兴建², 张义群³, 刘海燕³

(1.山东农业大学林学院,泰山森林生态系统国家定位观测研究站,泰安 271018;
2.山东省林业科学研究院,济南 250014;3.山东省药乡林场,泰安 271018)

摘要: 为了研究水源地上游林地产流及其氮磷迁移规律,采用人工模拟次降雨试验方法,选择鲁中南山区泰安市黄前水库上游药乡小流域赤松林地作为研究对象,以荒草地为对照,对其地表径流和壤中流及其氮磷流失特征进行研究。结果表明:(1)次降雨条件下赤松林地地表径流量低于荒草地,而荒草地壤中流量低于赤松林地,赤松林地及荒草地土壤入渗量与植被覆盖度呈正相关。随着降雨的进行,赤松林地和荒草地地表径流产流量不断增加且趋于稳定,壤中流产流时间比地表径流晚,径流量较平稳。(2)次降雨条件下地表径流全氮(TN)流失量呈现初期输出浓度较高,随降雨的进行,输出浓度减少并逐渐趋于稳定状态,壤中流呈现相对稳定的状态。TN流失量与输出浓度呈正相关。赤松林地地表径流及壤中流 TN流失量均低于荒草地。(3)次降雨条件下赤松林地地表径流全磷(TP)的输出浓度与流失量呈正相关;赤松林地地表径流及壤中流 TP流失量均低于荒草地的。(4)赤松林地及荒草地前期降雨 TN、TP总流失量均低于次降雨的;次降雨 TN总流失量是前期降雨的 1.11 倍;次降雨 TP总流失量是前期降雨的 1.15 倍。同时,次降雨赤松林地 TN、TP流失量均低于荒草地的。因此,与荒草地相比,赤松林地具有较好的调控氮磷流失的作用。

关键词: 赤松林; 模拟次降雨; 地表径流; 壤中流; 氮磷流失

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)03-0028-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.005

Characteristics of Runoff and Loss of Nitrogen and Phosphorus Losses in
Pinus densiflora Forest in Sandy Loam Soil in the
Mountain Area of South Central in Shandong Province
Under the Artificial Simulated Secondary Rainfall

ZHOU Rui¹, GAO Peng¹, WANG Rongjia¹, XU Jingwei²,

DUN Xingjian², ZHANG Yiqun³, LIU Haiyan³

(1.College of Forestry, Shandong Agricultural University, Mountain
Tai Forest Ecosystem Research Station of State, Tai'an, Shandong 271018; 2.Shandong Academy
of Forestry, Jinan 250014; 3.Yao Xiang Forest Farm of Shandong Province, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to study the production flow and nitrogen and phosphorus migration of forestland in the upstream of water source, the artificial simulated secondary rainfall test method was adopted to select *Pinus densiflora* forest and barren grassland in the upstream of Tai'an City Huangqian reservoir in the mountain area of south central in Shandong province as the research objects to study the characteristics of surface runoff and subsurface runoff and nitrogen and phosphorus loss. The results indicate that:(1)Under the condition of secondary rainfall, the surface runoff of *Pinus densiflora* forest is less than that of barren grassland. The subsurface runoff of barren grassland is less than that of *Pinus densiflora* forest. Soil infiltration of *Pinus densiflora* forest and barren grassland is proportion to vegetation coverage. The characteristics of surface runoff are small in the early stage, with the progress of rainfall, the runoff of *Pinus densiflora* forest and barren grassland is increasing and beconing stable, the subsurface runoff is later than the surface runoff, and the runoff is relatively stable.(2)Under the condition of secondary rainfall, the total nitrogen (TN) loss of surface runoff presented a higher output concentration in the initial stage. With the progress of rainfall, the output concentration decreased and gradually tended to be stable. TN loss is proportional to the loss con-

收稿日期:2019-09-21
资助项目:山东省农业财政资金(林业科技创新)项目(2019LY006);泰山森林生态系统国家定位观测研究站监测补助项目(2018-LYPT-DW-053)
第一作者:周锐(1995—),女,硕士研究生,主要从事土壤与水文生态研究。E-mail:2024079088@qq.com
通信作者:高鹏(1967—),男,博士,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

centration. The loss of TN in surface runoff and subsurface runoff in *Pinus densiflora* forest is lower than that in barren grassland. The TN loss of surface runoff in *Pinus densiflora* forest is less than that in barren grassland. The interflow presents a relatively stable state. The TN loss in the interflow of *Pinus densiflora* forest is less than that in barren grassland.(3) Under the condition of secondary rainfall, the total phosphorus (TP) output concentration of surface runoff in *Pinus densiflora* forest is positively proportional to the loss. The amount of surface runoff and subsurface runoff TP loss in *Pinus densiflora* forest is lower than that in barren grassland. The total amount of surface runoff TP loss in *Pinus densiflora* forest was lower than that in barren grassland, and the total amount of interflow TP loss in *Pinus densiflora* forest is lower than that in barren grassland.(4) The total loss of TN and TP in *Pinus densiflora* forest and barren grassland is less than that in the secondary rainfall. The total loss of TN is 1.11 times of the previous rainfall. The total loss of TP was 1.15 times of the previous rainfall. At the same time, the loss of TN and TP in *Pinus densiflora* forest is less than that in the barren grassland. Therefore, compared with the barren grassland, *Pinus densiflora* forest has a better role in regulating the loss of nitrogen and phosphorus.

Keywords: *Pinus densiflora* forest; artificial simulated secondary rainfall; surface runoff; subsurface runoff; nitrogen and phosphorus loss

降水是坡地进行产流产沙的先决条件,地表径流和壤中流极易造成坡地土壤中氮、磷等养分的流失^[1],是导致下游水库和水源地环境污染的主要因素。因此,关于水源地上游林草植被调控降雨径流及氮磷流失特点的研究已经成为人们普遍关注的问题。目前,许多专家学者已经开展了大量的研究工作,崔可^[2]发现,植被覆盖度是影响径流的重要原因,也是减少氮素流失的主要方式^[3];王帅兵等^[4]在对松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的研究中发现,坡耕地氮、磷流失的方式主要是通过径流和泥沙流失的。目前关于坡地氮、磷流失的研究主要集中在不同土地利用方式、不同雨强及运用模型进行相关的试验研究^[5-7]。次降雨是造成地表径流和壤中流氮、磷流失的原因之一,目前针对次降雨多集中于坡面产流产沙^[8],南方紫色土壤氮磷流失的研究^[9-10]等方面。水库上游水源地径流及其氮磷流失是水库的主要污染源,但是,尚缺少关于次降雨条件下水库上游水源林地表径流和壤中流及其氮磷流失规律的研究。

黄前水库上游药乡小流域地处鲁中南山区,属于黄河大汶河流域,是我国北方土石山区典型区域,赤松林是黄前水库上游药乡小流域重要的水源涵养林树种。为研究次降雨条件下小流域林地产流及氮磷流失特征,选择该流域典型树种赤松林以及荒草地(对照)为研究对象,通过人工模拟次降雨产流试验方法,探讨次降雨条件下林地地表径流及壤中流氮磷流失比例和流失规律,为水库上游污染控制和水源涵养林营造及综合评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位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),该站位

于北方土石山区鲁中南山区丘区西北部,属于山东省泰安市黄前水库药乡小流域,地处黄河大汶河流域,该流域是北方土石山区鲁中南山区典型区域,是重要的水源涵养区。赤松林地作为该区域典型的生态造林树种,选择该区域赤松林地进行研究具有一定的代表性和典型性。研究区气候类型属暖温带大陆性湿润季风气候,降水多集中于6—9月,多年平均降水量为727.9 mm,多年平均气温为18.5℃。土壤类型主要为棕壤,占土壤总面积的52%,是该区域典型土壤类型之一,土层平均厚度30~40 cm,呈微酸性,pH为5.5~6.5,质地为砂质壤土,土壤渗透能力强,质地松散,保水、保肥能力较差,水土流失情况较严重。流域内岩石多由花岗片麻岩类、变粒岩及混合岩类等组成。地表植物主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、赤松(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)、日本落叶松(*Larix kaempferi* Carr.)、华北绣线菊(*Spiraea fritschiana* Schneid.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、白羊草(*Bothriochloa aischaeumum* (L.) Keng)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC.)等。

1.2 试验设计

1.2.1 野外取样 2019年5月选择海拔、盖度及树龄相近的赤松林(25年),选取坡向及坡位较为一致的赤松林地及荒草地(对照)作为标准地,在标准地中分别选取3个赤松林地和3个与其对照的荒草地作为样地,每个样地大小为1.5 m×2.0 m,用于进行平行降雨试验。由于40 cm以下土层为未完全风化的岩石,因此设计取土深度为40 cm。原状土采集时,在选择的赤松林地和荒草地的样地中分别取样。为了确保采集的土样不被破坏,取样时,将样地的枯落物层、地表植被层、土壤层分别分层取样并测定土壤含水量以及土壤容重,并按照自

上至下的顺序装袋编号。土样采集后,运至山东农业大学人工降雨大厅,将土样按编号顺序放入试验径流槽内,把收集的枯落物放置在土样上,尽量保证与取样时

的地貌相接近,当径流槽内土样的土壤容重和土壤含水量状况接近原状土样时,开始进行人工模拟降雨试验。试验标准地基本情况见表 1。

表 1 标准地基本情况

样地	土壤类型	土层厚度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/ %	砂粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	平均坡度/(°)	含水量/ %	郁闭度/%
赤松林	棕壤	40.0	1.41	47.63	50.91	46.29	2.80	1.15	0.21	16	15.86	75
荒草地	棕壤	40.0	1.48	41.26	49.34	41.73	8.93	1.92	0.27	16	11.50	—

1.2.2 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 人工模拟降雨系统进行降雨试验,通过参照李小华等^[11]及谢哲芳等^[12]模拟降雨仪器的参数,在降雨高度为 2.3~5.0 m 的范围内,设定本试验降雨高度为 3.0 m,降雨均匀系数>86%,降雨的特征值接近自然降雨,具体参数见表 2。以研究区 30 年的降雨资料为基础,结合试验需要,设定模拟降雨试验的降雨强度为 75 mm/h(重现期 2.5 年)。在人工模拟降雨试验仪器下放置试验径流槽,径流槽中装有助于平行降雨的土样。根据研究区标准地坡度,设置径流槽倾斜度为研究区标准地的平均坡度 16°。试验径流槽可同时收集地表径流和壤中流的产流(图 1)。6 个样地都进行平行降雨试验,前期降雨之间相隔 15 天进行,前期降雨与次降雨相隔 2 天进行,前期降雨共进行 6 场降雨试验(赤松林地和荒草地各 3 场),次降雨共进行 6 场降雨试验(赤松林地和荒草地各 3 场),文中数据均为平行降雨试验数据的平均值。在正式降雨之前以及降雨结束后,均要对降雨强度进行率定,以确保模拟降雨的稳定,2 次率定的误差不超过 5%,2 次率定的平均值作为试验降雨的强度。每次降雨试验用水均为自来水,以确保因试验用水产生的误差值最小。模拟降雨时间为 50 min,在降雨开始后,分别记录降雨开始的时间、地表径流和壤中流开始产流的时间,产流开始后,每 5 min 采集 1 次地表径流和壤中流的产流并记录。降雨结束时记录降雨停止时间和产流停止时间。

表 2 人工模拟降雨系统参数

降雨指标	参数
有效降雨面积	1.5 m×2.0 m
降雨高度	3 m
雨强连续变化范围	30~150 mm/h
降雨均匀度系数	>86%
雨滴大小调控范围	1.7~5.0 mm
降雨调节精度	7 mm/h
降雨测量精度	0.01 mm/h

1.3 样品分析方法与数据分析

水样采集后加浓硫酸至 pH<2 进行保存并在 24 h 内带到实验室进行测定^[13]。通过过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定水样全氮(TN)^[14];通过过硫酸钾氧

化—钼蓝比色法测定水样全磷(TP)^[15]。为确保试验用水对试验结果的影响最小,试验过程中试验用水一致。

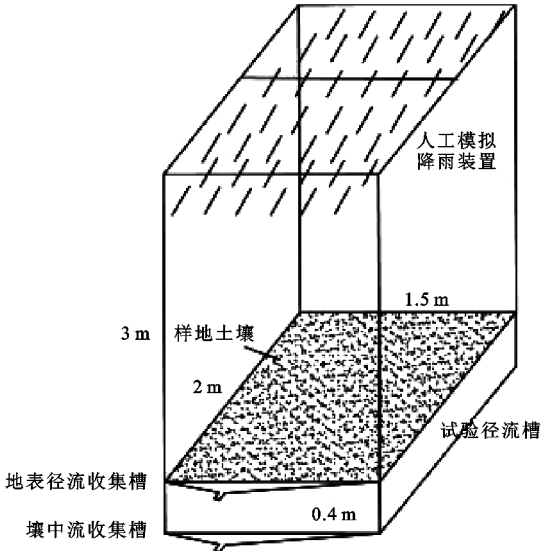


图 1 试验装置示意

1.4 数据处理

采用 SPSS 对数据进行差异显著性分析,显著水平为显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$),图件均采用 Excel 2016 绘制。

2 结果与分析

2.1 次降雨条件下赤松林地和荒草地产流特征

2.1.1 次降雨条件下地表径流产流特征 由图 2(a)可知,人工模拟次降雨条件下随着降雨的进行,赤松林地和荒草地地表径流产流量不断增加且趋于稳定。赤松林地地表径流的产流时间在 4 min 左右,荒草地地表径流的产流时间在 2 min 左右,赤松林地产流时间滞后于荒草地。这是由于赤松林地植被覆盖度高,林下植被和枯落物对降雨有较好的拦挡作用。当到达土壤表面的降雨越来越多,土壤中含水量逐渐趋于饱和时,地表径流量逐渐稳定。根据试验结果可知,赤松林地的地表径流量为 97.61 L,荒草地的地表径流量为 105.34 L,赤松林地地表径流量是荒草地的 92.66%,这是因为赤松林地林下植被覆盖度高,林下植被和枯落物对地表径流有较好的拦蓄作用,增加了雨水下渗,有利于壤中流的产生。降水过程中植被覆盖是影响地表水文特征的重要因素^[16], Suescún

等^[17]研究发现,植被类型的差异对坡面水蚀过程影响显著,在相同降水条件下,草地的地表径流量可达

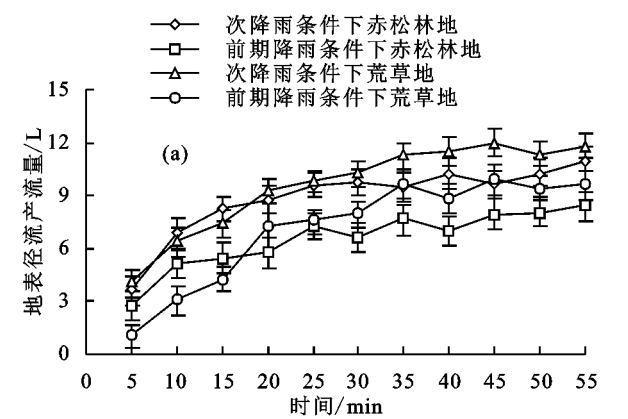
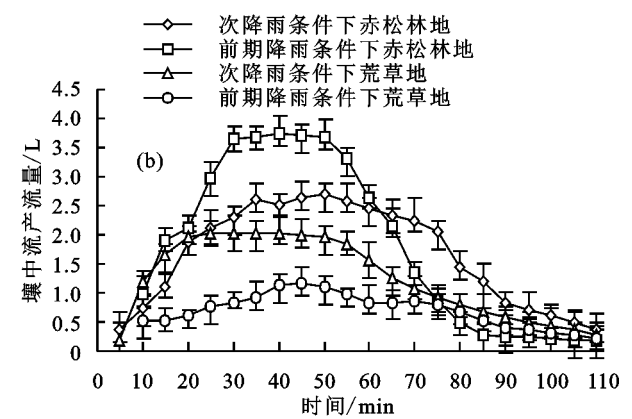


图 2 次降雨条件下赤松林地与荒草地地表径流及壤中流产流特征

2.1.2 次降雨条件下壤中流产流特征 由图 2(b)可知,次降雨赤松林地壤中流产流时间在 7 min 左右,荒草地壤中流产流时间在 6 min 左右。与地表径流相比,赤松林地和荒草地的壤中流产流时间均比地表径流晚,这是由于当土壤含水量达到饱和时才开始产生壤中流。赤松林地和荒草地壤中流的产流量随着时间的推进不断增加,当到达峰值后逐渐降低,在降雨停止后,由于缺少降雨的补充,壤中流产流开始减少,直至停止。虽然壤中流产流晚于地表径流,但产流时间相较于地表径流更长^[18]。由表 3 可知,赤松林地壤中流量为 36.17 L,荒草地壤中流量为 27.34 L,赤松林地是荒草地的 1.32 倍,赤松林地与荒草地相比,植被覆盖度较高,有利于雨水下渗,形成壤中流,何继军等^[8]同

到林地条件的 3 倍,这与本研究中赤松林地地表径流量小于荒草地的研究结果相一致。



样在研究中得出,入渗量随着植被覆盖度的增加而增加的结论。

由表 3 可以看出,次降雨条件下赤松林地地表径流量是产流总量的 72.96%,荒草地地表径流量是产流总量的 79.39%,赤松林地壤中流量是产流总量的 27.04%,荒草地壤中流量是产流总量的 20.61%,说明地表径流是赤松林地和荒草地的主要流失方式。荒草地地表径流量大于赤松林地,由于荒草地植被覆盖率低,入渗能力差,黄俊等^[19]研究发现,土壤入渗能力与植被覆盖度具有正相关关系。因此,相较于荒草地,赤松林地具有渗透快、蓄水量大的特点,在降雨过程中可以降低径流流速,具有削弱地表径流对土壤的冲刷,减少水土流失的作用。

表 3 次降雨条件下赤松林地和荒草地产流特征

样地	径流类型	前期降雨			次降雨		
		产流时间/min	径流量/L	占比/%	产流时间/min	径流量/L	占比/%
赤松林地	地表径流	5	72.21D	65.17	4	97.61B	72.96
	壤中流	6	38.60a	34.83	7	36.17a	27.04
	总产流	—	110.81	—	—	133.78	—
荒草地	地表径流	3	78.77C	84.37	2	105.34A	79.39
	壤中流	8	14.59c	15.63	6	27.34b	20.61
	总产流	—	93.36	—	—	132.68	—

注:表中同列不同大(小)写字母表示地表径流(壤中流)产流差异显著($p<0.05$);前期降雨赤松林地土壤含水量为 13.50%,荒草地为 9.43%,次降雨赤松林地土壤含水量为 16.80%,荒草地为 13.77%。

2.2 次降雨条件下赤松林地和荒草地氮磷流失特征

2.2.1 次降雨条件下氮素(TN)流失特征 由图 3(a)可知,次降雨条件下赤松林地和荒草地地表径流均呈现 TN 输出浓度初期较高,随降雨的进行逐渐减少并趋于稳定的状态。由表 4 可知,荒草地地表径流 TN 流失量高于赤松林地;荒草地 TN 流失总量为 178.98 mg,赤松林地流失总量为 145.64 mg,是荒草地的 81.37%。荒草地 TN 平均输出浓度为 1.76 mg/L,赤松林地 TN 平均输出浓度为 1.53 mg/L。与赤松林地相比,荒草地地表径流 TN 输出浓度更高,说明地表径流

流失量与地表径流 TN 平均输出浓度成正相关。史佳良等^[20]研究发现,氮磷流失总量在不同土地利用方式下表现为:草地>农田>果园>林地,而氮磷含量大小基本表现为:草地>农田>林地>果园,与本研究结果相一致。与荒草地相比,赤松林地具有更好地拦截地表径流、控制氮素流失的作用。通过试验结果可知,地表径流 TN 流失量是 TN 总流失量的 68.82%,说明地表径流是造成氮素流失的主要途径。

由图 3(b)可知,在降水过程中赤松林地和荒草地壤中流 TN 输出浓度波动较低(1~5 mg/L),呈现

动态平衡的状态,周林飞等^[21]在研究中发现,壤中流氮素流失量在产流过程中保持相对平稳。对此王荣嘉等^[22]研究认为,赤松林地的壤中流流速比较缓慢,流速波动较小,因而在径流过程中,壤中流与土壤深层的氮元素的交换相对平衡。通过表 4 可知,荒草地壤中流 TN 流失量高于赤松林地,荒草地壤中流 TN 流失总量为 78.99 mg,赤松林地壤中流 TN 流失总量为 68.11 mg,荒草地比赤松林地高 13.77%。荒草地壤中流 TN 平均输出浓度为 2.96 mg/L,赤松林地壤中流 TN 平均输出浓度为 1.88 mg/L,赤松林地 TN 平均输出

浓度为荒草地的 63.51%,王荣嘉等^[22]在模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征的研究中发现,麻栎林地壤中流中氮流失浓度低于荒草地。在本研究中,赤松林地 TN 流失量低于荒草地的,与荒草地相比,赤松林地对氮素的调控效果更好。

通过试验结果可知,荒草地地表径流 TN 输出浓度是赤松林地的 1.15 倍,荒草地壤中流 TN 输出浓度是赤松林地的 1.57 倍,说明与荒草地相比,赤松林地可以较好地减少氮素流失,促进雨水径流下渗,减少氮素流失造成的污染。

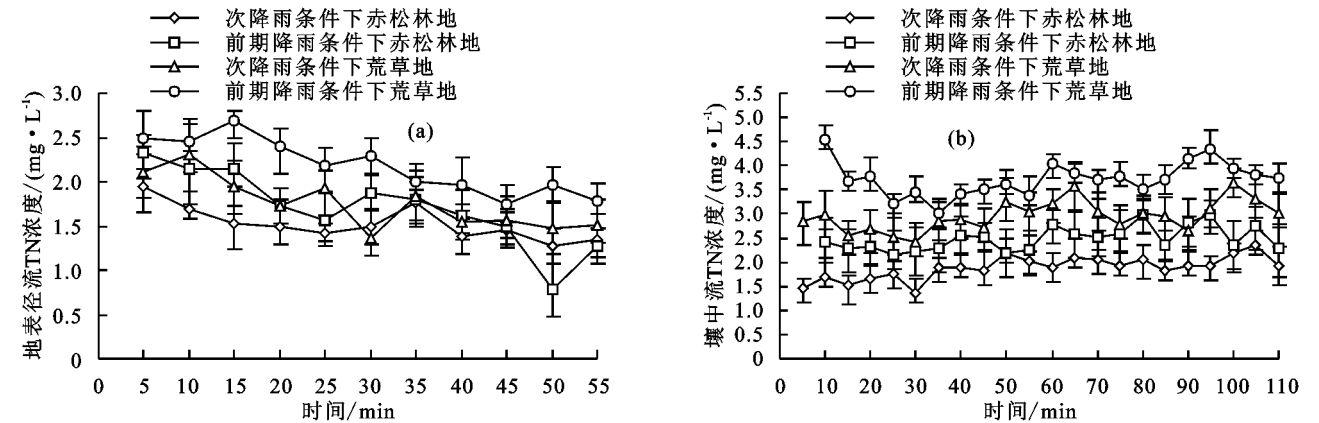


图 3 次降雨条件下赤松林地与荒草地地表径流及壤中流 TN 流失特征

表 4 次降雨条件下赤松林地和荒草地氮磷流失特征

样地	径流 类型	TN 流 失量/mg	占比/ %	TN 平均浓度/ (mg · L ⁻¹)	TP 流失量/ mg	占比/ %	TP 平均浓度/ (mg · L ⁻¹)
前期降雨	赤松林地 地表径流	116.97C	55.86	1.70B	17.83C	87.88	0.2B
	赤松林地 壤中流	92.42a	44.14	2.48c	2.46ab	12.12	0.06b
	总产流	209.39	—	4.18	20.29	—	0.26
前期降雨	荒草地 地表径流	163.79A	74.48	2.18A	32.91B	94.14	0.42A
	荒草地 壤中流	53.21c	24.52	3.72a	2.05ab	5.86	0.14a
	总产流	217.00	—	5.90	34.96	—	0.56
次降雨	赤松林地 地表径流	145.64B	68.14	1.53B	20.53C	91.49	0.23B
	赤松林地 壤中流	68.11b	31.86	1.88d	1.91b	8.51	0.05b
	总产流	213.75	—	3.41	22.44	—	0.28
次降雨	荒草地 地表径流	178.98A	69.38	1.76B	38.50A	93.58	0.37A
	荒草地 壤中流	78.99b	30.62	2.96b	2.64a	6.42	0.10ab
	总产流	257.97	—	4.72	41.14	—	0.47

注:TN 代表全氮,TP 代表全磷,表中同列不同大(小)写字母表示地表径流(壤中流)产流差异显著($p<0.05$)。

2.2.2 次降雨条件下磷素(TP)流失特征 由图 4 (a)可知,次降雨赤松林地地表径流 TP 输出浓度呈现随降雨的进行,浓度逐渐降低的趋势,TP 流失量由 1.28 mg 下降到 0.4 mg,这是因为磷素的输出浓度与流失量呈正相关,流失量越小,TP 浓度越小,流失量越大,TP 浓度越大。彭宏佳等^[23]研究发现,在一定的降雨强度条件下,磷素的流失量迅速增大; Forsyth 等^[24]发现,TP 流失浓度在降雨初期最高,随时间增加而减少,与本研究结果中磷素的输出浓度与流失量呈正相关的结果相类似。次降雨荒草地的 TP 初始浓度略高于赤松林地,荒草地、赤松林地的

分别为 0.36,0.35 mg/L,赤松林地与荒草地的 TP 输出浓度随着降雨的进行逐渐减少并且趋于稳定,这是因为在降雨初期,土层表面 TP 较富集,但是在降雨的过程中,磷元素随着地表径流迁移,浓度逐渐减小。荒草地的地表径流 TP 流失总量为 38.50 mg,赤松林地的地表径流 TP 流失总量为 20.53 mg,赤松林地是荒草地的 53.32%。说明赤松林地的植被覆盖可以有效地减少 TP 流失。

由图 4(b)可知,次降雨条件下赤松林地和荒草地壤中流 TP 输出浓度在产流过程中呈动态平衡趋势。赤松林地和荒草地的壤中流 TP 平均输出浓度

分别为 0.05,0.10 mg/L,赤松林地低于荒草地,是荒草地的 50%。荒草地的壤中流 TP 流失量高于赤松林地,荒草地的 TP 流失量为 2.64 mg,赤松林地仅为荒草地的 72.35%。赤松林地植物根的生长改善了土

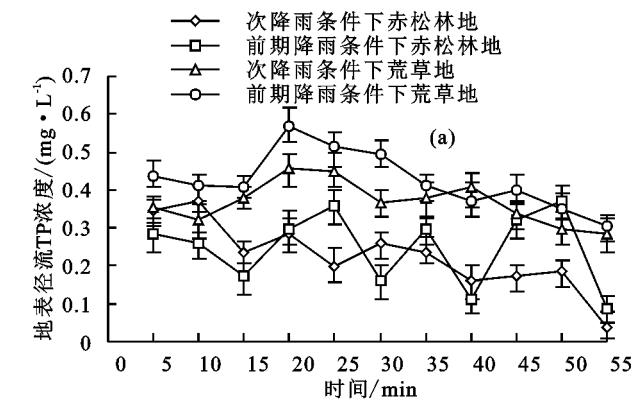


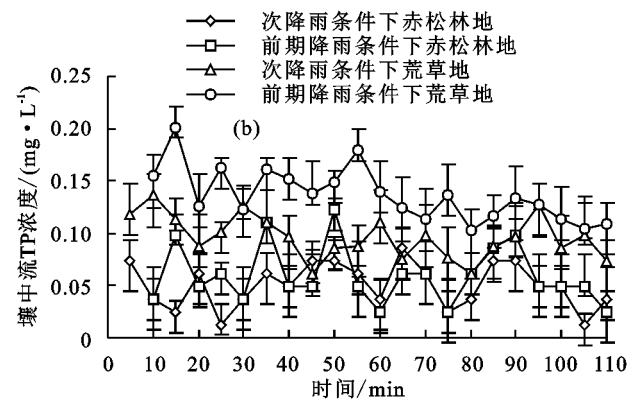
图 4 次降雨条件下赤松林地与荒草地地表径流及壤中流 TP 流失特征

2.3 次降雨与前期降雨条件下赤松林地和荒草地氮磷流失比较分析

如图 3(a)所示,次降雨及前期降雨条件下地表径流 TN 输出浓度呈现初期较高,随着降雨的进行,浓度逐渐降低且趋于平稳的趋势。由表 4 可知,次降雨赤松林地和荒草地地表径流 TN 流失总量为 324.62 mg,是前期降雨的 1.16 倍;次降雨平均输出浓度为 1.65 mg/L,是前期降雨的 85.05%。这是因为在前期降雨时土壤中的氮素随壤中流迁移,土壤中的氮素减少,在进行次降雨时,氮素得不到及时的补充,在前期降雨的基础上再次输出,浓度较前期降雨有所降低。次降雨赤松林地 TN 流失总量、平均输出浓度分别为 213.75 mg、3.41 mg/L,次降雨荒草地 TN 流失总量、平均输出浓度分别为 257.97 mg、4.72 mg/L,TN 流失总量、平均输出浓度分别是赤松林地的 1.21,1.38 倍。与荒草地相比,赤松林地 TN 流失量和平均输出浓度更低,由于林地比荒草地的植被覆盖度高,土壤中的植物根系发达,可以有效减少地表径流及壤中流中的 TN、TP 的流失,因此林地中的氮磷流失量比荒草地少^[26]。

如图 4(a)所示,次降雨及前期降雨赤松林地和荒草地地表径流 TP 输出浓度在降雨产流过程中呈现初期浓度较高,随时间的推移逐渐降低并趋于平稳。向速林等^[27]在研究中发现,在降雨形成初期,径流中磷含量在初期相对较高,随着降雨的进行,径流中的氮、磷流失量不断减少。由表 4 可知,前期降雨赤松林地和荒草地的 TP 流失总量为 55.25 mg,次降雨 TP 流失量为 63.58 mg,是前期降雨的 1.15 倍;前期降雨赤松林地 TP 总流失量为 20.29 mg,TP 平均输出浓度为 0.26 mg/L,次降雨 TP 总流失量为 22.44 mg,TP 平均输出浓度为 0.28 mg/L,分别是前期降雨的 1.11,1.08 倍。前期降雨荒草地 TP 总流失量为

壤结构,提高了对磷素拦蓄的能力。虽然,赤松林地及荒草地地表径流 TP 流失量高于壤中流,TP 的流失方式主要通过地表径流^[25],但是,随壤中流流失的 TP 也占据一定比例,同样不容小觑。



34.96 mg,TP 平均输出浓度为 0.56 mg/L,次降雨 TP 总流失量为 41.14 mg,TP 平均输出浓度为 0.47 mg/L,次降雨赤松林地的 TP 总流失量与 TP 平均输出浓度均高于前期降雨,次降雨赤松林地的 TP 总流失量与 TP 平均输出浓度均低于荒草地的。因此,与荒草地相比,赤松林地可以有效拦截磷元素,减少磷元素的流失,对磷素的调控效果更好。

不论是在前期降雨还是次降雨条件下,赤松林地和荒草地氮素流失量均大于磷素,Wu 等^[28]认为,径流对于磷素的影响小于氮素的,这可能是由于土壤本身对磷素有较强的固定作用,并且磷素本身的迁移能力较弱^[29],加之地上植被可以拦截径流,从而减少随径流流失的氮磷元素,但是氮素不易被拦截吸收,导致氮素流失量大于磷素。

3 结论

(1)次降雨条件下赤松林地地表径流量是荒草地的 92.66%,赤松林地壤中流量是荒草地的 1.32 倍,赤松林地及荒草地土壤入渗量与植被覆盖度呈正相关。随着降雨的进行,赤松林地和荒草地地表径流产流量不断增加且趋于稳定,壤中流产流时间比地表径流晚,径流量较平稳。与荒草地相比,赤松林地在保持水土、涵养水源方面效果更好。

(2)次降雨条件下地表径流全氮(TN)流失量呈现初期输出浓度较高,随降雨的进行,输出浓度减少并逐渐趋于稳定状态。TN 流失量与输出浓度呈正相关。赤松林地地表径流及壤中流 TN 流失量均低于荒草地的;赤松林地地表径流 TN 流失量比荒草地低 18.63%。赤松林地壤中流 TN 流失量比荒草地低 13.77%。说明赤松林地对 TN 的调控效果比荒草地显著。

(3)次降雨条件下赤松林地地表径流全磷(TP)的输出浓度与流失量呈正相关。赤松林地地表径流

及壤中流 TP 流失量均低于荒草地的;赤松林地地表径流 TP 流失量比荒草地低 46.68%,赤松林地壤中流 TP 流失量比荒草地低 27.65%。说明赤松林地对 TP 的调控效果比荒草地显著。

(4)赤松林地及荒草地前期降雨 TN、TP 总流失量均低于次降雨的;次降雨 TN 总流失量是前期降雨的 1.11 倍;次降雨 TP 总流失量是前期降雨的 1.15 倍;同时,次降雨赤松林地 TN、TP 流失量均低于荒草地的。因此,与荒草地相比,赤松林地具有较好地调控氮磷流失的作用。

参考文献:

- [1] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67.
- [2] 崔可.南方丘陵地区不同植被覆盖模式下水土保持效益的对比分析[J].水土保持应用技术,2019(4):19-22.
- [3] 张铁钢,李占斌,李鹏,等.模拟降雨条件下不同种植方式的坡地氮素流失特征[J].水土保持学报,2016,30(1):5-8.
- [4] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [5] 高超,朱继业,朱建国,等.不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J].环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
- [6] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,等.模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J].农业工程学报,2017,33(2):131-140.
- [7] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定[J].水土保持研究,2018,25(5):205-210.
- [8] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [9] 王玉霞,龙天渝,卢齐齐.二次降雨条件下紫色土壤中流的氮磷流失特征研究[J].中国水土保持,2011(5):33-35.
- [10] 徐亚娟,高扬,朱宁华,等.紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷[J].生态学报,2014,34(17):5021-5029.
- [11] 李小华,曹月娥,杨建军.人工模拟降雨条件下伊犁河流域黄土区土壤侵蚀试验分析[J].水土保持学报,2016,30(1):36-40.
- [12] 谢哲芳,张光辉,刘如心,等.人工模拟降雨供水水质对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):18-23.
- [13] 王栋春,蒋风华,孙刚.过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定水中总氮空白用水的选择[J].黑龙江环境通报,2003,27(1):80-81.
- [14] 祁娟娟,梁晓.过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定水中总氮方法的探讨[J].内蒙古环境保护,2000(3):31-32.
- [15] 王荣嘉,高鹏,李成,等.退耕林地麻栎刺槐林壤中流及其磷素流失特征[J].水土保持学报,2019,33(1):9-13.
- [16] Mohammadreza H, Violette, Oscar G P, et al. Effects of fire occurrence and recurrence on nitrogen and phosphorus losses by overland flow in maritime pine plantations in north-central Portugal[J]. Geoderma, 2017, 289: 97-106.
- [17] Suescún D, Villegas J C, León J D, et al. Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(3): 827-839.
- [18] 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.
- [19] 黄俊,亢庆,金平伟,等.南方红壤区坡面次降雨产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2016,14(2):23-30.
- [20] 史佳良,王秀茹,李淑芳,等.次降雨过程中北京市不同土地利用方式下土壤养分流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):58-63.
- [21] 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.
- [22] 王荣嘉,高鹏,李成,等.模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征[J].生态学报,2019,39(8):2732-2740.
- [23] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.
- [24] Forsyth A R, Bubbs K A, Cox M E. Sediment and nutrient losses from exotic *Pinus* plantation management operations under simulated rainfall[J]. Australian Forestry, 2006, 69(1): 58-67.
- [25] Yang J L, Zhang G L, Shi X Z, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 292-299.
- [26] Goloran J, Phillips I, Chen C. Forms of nitrogen alter plant phosphorus uptake and pathways in rehabilitated highly alkaline bauxite processing residue sand[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(2): 628-637.
- [27] 向速林,陶术平,王逢武.不同土地利用类型降雨径流氮磷特征分析:以赣江下游地区为例[J].人民长江,2015,46(16):80-82.
- [28] 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[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7): 1939-1949.
- [29] 郭新送,宋付朋,高杨,等.模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J].水土保持学报,2014,28(3):23-28.