

不同放牧制度对呼伦贝尔草原径流中磷流失模拟研究

樊才睿, 李畅游, 孙标, 史小红, 杨芳, 王静洁, 韩知明

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为了探究不同放牧制度对干旱半干旱地区草原土壤磷元素流失的影响, 以呼伦贝尔砂质草原为研究对象, 通过设置不同降雨强度, 选择自由放牧、轮牧、休牧草场进行人工模拟降雨试验, 利用混合深度模型模拟磷流失过程。结果表明: 在4种雨强下, 自由放牧草场总磷流失量最大, 是休牧草场的1.31~1.50倍, 是轮牧草场的1.59~1.74倍。颗粒态磷为草场土壤磷素的主要流失形式, 其含量为溶解态磷的2.2~3.7倍。混合深度模型模拟结果显示, 不完全混合模型的优于完全混合模型, 并且在雨强较高情况下的模拟效果较好。在雨强小于1.5 mm/min降雨事件中, 放牧制度对磷元素流失影响显著($p < 0.05$), 轮牧草场磷流失最少。因此, 适当的将呼伦贝尔草原自由放牧草场向休牧和轮牧草场转变, 将有利于减少草场磷元素流失及草原生态可持续发展。

关键词: 不同放牧制度; 总磷; 溶解态磷; 颗粒态磷; 有效混合深度

中图分类号: S157.1; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0017-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.004

Study on Effects of Different Grazing Systems on Phosphorus Loss in Surface Runoff in Hulunbair Grasslands

FAN Cairui, LI Changyou, SUN Biao, SHI Xiaohong, YANG Fang, WANG Jingjie, HAN Zhiming

(Water Conservation and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: The Hulunbair sandy grassland was used as the research object, and studied the effects of different grazing systems on phosphorus characteristic and phosphorus loss in surface runoff in arid and semi-arid grassland. We simulated rainfall with different intensities to study phosphorus concentration changing of surface runoff under three types of grazing systems such as no grazing, rotation grazing and free grazing. The effective mixing depth model was used to simulate the process of phosphorus loss from soil. Conclusions were as follows: Under different rainfall intensities, phosphorus runoff loss of free grazing system was the highest; its phosphorus loss was 1.31 to 1.5 times for no grazing grassland and 1.59 to 1.74 times for rotation grazing grassland. Particulate phosphorus was the major form phosphorus in the runoff and its content was 2.2 to 3.7 times higher than dissolved phosphorus. According to the result of experimental data fitting, the incomplete mixing model was better than the complete mixing model, and the model could simulate accurately for the case of higher rainfall intensity. The different grazing systems had significant influences on phosphorus losses in runoff under the rainfall intensity less than 1.5 mm/min. The phosphorus losses in rotation grazing grassland were the lowest. So, if we gently changed the grazing systems from the free grazing to no grazing and rotation grazing, the phosphorus loss situation would be decreased, which also would be helped for ecologically sustainable development in grassland.

Keywords: different grazing systems; total phosphorus; dissolved phosphorus; particulate phosphorus; effective mixing depth

降雨径流过程不仅会造成土壤中营养元素的流失,降低土壤的肥力,而且是流域内水体富营养化的主要污染源^[1]。磷是造成湖泊富营养化的主要污染物之一,径流中磷的含量多少决定着流域湖泊及水体污染程度的严重与否,而降雨产流过程和径流对磷

的承载能力是决定径流中磷含量多少关键因素。不同放牧制度通过改变下垫面条件对降雨产流过程产生影响,因此研究不同放牧制度草原土壤中磷素随地表径流的迁移规律及流失特征对防治面源污染及缓解水土流失状况具有重要的现实及理论意义。

收稿日期:2016-09-06

资助项目:国家自然科学基金项目(51409288,51339002,51509133,51569019,51669022);内蒙古农业大学优秀青年科学基金项目(2014XYQ-10)

第一作者:樊才睿(1989—),男,博士研究生,主要从事生态水文过程研究。E-mail:fancairui@126.com

通信作者:李畅游(1955—),男,教授,主要从事水环境保护与湿地环境修复研究。E-mail:nndlichangyou@163.com

目前,国内外学者针对不同地貌地区的土壤侵蚀及营养元素流失问题,利用人工降雨模拟试验在室内及野外对水土流失进行模拟^[2-3],或者通过对天然降雨的长期观测建立小区域水土流失及营养元素流失与降雨的关系,定量的研究土壤溶质流失过程^[4]。针对不同降雨产流的影响因素进行了特定的研究,主要集中在前期含水量对降雨入渗产流及营养元素流失的影响^[5],植被覆盖度及坡度对降雨产流过程的影响^[6]等方面。部分学者对不同作物的土壤侵蚀及营养元素流失过程差异进行分析^[7]。并利用同位素示踪技术从表层径流的研究深入到壤中流迁移过程对营养元素的淋溶作用^[8]。在我国大多数研究主要针对于南方红色及紫色土壤的农田丘陵地区,以及黄土高原水土流失严重的地区^[9-11],对生态环境薄弱的砂质草原在降雨过程中营养元素流失状况考虑较少^[12],而北方砂质土壤与南方红壤及紫壤土相比具有磷含量少,磷元素容易流失等特点,一旦磷元素发生损失,土壤中磷元素补充过程漫长,并会造成地表植被生长缓慢、植株矮小等问题。因此,本研究选取不同放牧制度砂质草场为研究对象,利用人工模拟降雨试验,研究各降雨条件下不同放牧活动对地表植被

的影响进而造成营养元素流失的差异。

本文以呼伦贝尔砂质草原不同放牧草场为研究对象,对具有一定坡度的自由放牧(ZY)、轮牧(LM)、休牧(XM)草场进行降雨模拟试验,通过对径流量中的不同形态磷元素进行定量分析,利用降雨过程中磷素流失过程曲线,间接地反映降雨对流域内湖泊水体造成的污染程度,得出砂质草原不同放牧制度对磷元素流失的影响,为干旱半干旱地区湖泊富营养化的污染源控制及生态环境保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取内蒙古呼伦贝尔草原的砂质草场为研究区,该区位于新巴尔虎右旗宝东苏木,气候为干旱半干旱气候,年平均温度 $(-0.6) \sim (1.1) ^\circ\text{C}$,年降水量为 $240.5 \sim 283.6 \text{ mm}$,年蒸发量为 $1\,455.3 \sim 11\,754.3 \text{ mm}$,年平均风速为 $3.38 \sim 3.92 \text{ m/s}$,日照时数为 $2\,694 \sim 3\,131 \text{ h}$,全年无霜期为 $110 \sim 160 \text{ d}$,区域海拔 $700 \sim 1\,000 \text{ m}$,流域国内部分面积 $39\,000 \text{ km}^2$ ^[13]。试验区主要土壤为砂土及壤砂土,主要优势植被为羊草、糙隐子草、克氏针茅等植被。植被性质与土壤性质如表 1 所示。

表 1 休牧(XM)、轮牧(LM)、自由放牧(ZY)草地植被性质与土壤性质

样地	株度/ cm	盖度/ %	叶面积指数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	土壤含水量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤质地
ZY	$10.5 \pm 2.54\text{a}$	$37 \pm 8.71\text{a}$	$1.37 \pm 0.15\text{a}$	$16.5 \pm 2.3\text{a}$	$0.44 \pm 0.11\text{a}$	$1.33 \pm 0.28\text{a}$	砂土
LM	$25.4 \pm 4.02\text{b}$	$70 \pm 3.07\text{b}$	$2.72 \pm 0.27\text{b}$	$15.3 \pm 1.7\text{a}$	$0.48 \pm 0.09\text{b}$	$1.21 \pm 0.25\text{b}$	砂土
XM	$37.8 \pm 5.26\text{c}$	$87 \pm 3.01\text{c}$	$4.36 \pm 0.20\text{c}$	$17.7 \pm 1.4\text{c}$	$0.84 \pm 0.16\text{c}$	$1.86 \pm 0.16\text{c}$	壤砂土

注:表中数值为平均值±标准差,重复为 6;同列数据后不同字母表示处理间存在显著差异($p < 0.05$)。

1.2 样地设置

选取研究区域内的 3 种放牧制度草场:休牧($48^\circ 28' 33'' \text{ N}, 117^\circ 11' 41'' \text{ E}$)、轮牧($48^\circ 28' 33'' \text{ N}, 117^\circ 13' 09'' \text{ E}$)、自由放牧($48^\circ 27' 55'' \text{ N}, 117^\circ 16' 20'' \text{ E}$),分别在 3 种草场内进行模拟降雨试验。研究区内的 3 种放牧草场其基本状况为自由放牧草场理论载畜率为 $200 \text{ 羊}/\text{km}^2$,实际载畜率可以达到 $800 \text{ 羊}/\text{km}^2$;轮牧草场主要为小区域的划区轮流放牧,周期为 60 d ,每区域连续放牧 15 d ,草场理论载畜率 $400 \text{ 羊}/\text{km}^2$,实际载畜率 $500 \text{ 羊}/\text{km}^2$;休牧草场主要为封围禁牧,全年无载畜,只在秋季进行刈割打草^[14]。

在 3 种放牧草场进行植被生长状况及土壤现状调查,在 3 种放牧制度草场中选取 3 块地形平坦的草地($5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),随机选取 5 块($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)的样方,设置 3 个重复。测定盖度、株高、株密度、叶面积指数等植被指标。测定表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤的理化性质:土壤含水率、土壤全磷、有效磷等指标。

1.3 研究方法

1.3.1 装置与材料 本研究的人工模拟降雨试验采

用自行研制的管网式模拟降雨装置^[14],该装置主要由 3 部分构成:(1)降雨器(竖向排列具有均匀小孔的 PVC 管);(2)供水系统(水箱、发电机、水泵、供水管线及回流管线);(3)支撑系统(支撑降雨器,调节降雨器高度);(4)辅助系统(引流槽、档流板),见图 1。降雨器高度 2.5 m ,供水管线压力为 $0 \sim 100 \text{ kPa}$,有效降雨面积为 1.8 m^2 ,降雨试验坡度 5° ,降雨强度为 $0.33 \sim 3 \text{ mm}/\text{min}$,降雨均匀度均可达到 80% 以上。

1.3.2 试验步骤 试验选取在自由放牧草场、轮牧草场、休牧草场进行人工模拟降雨试验,该试验区域的整体坡度为 $4^\circ \sim 5^\circ$,降雨试验开始前在降雨有效区周围插入刚性挡流板,仅在下坡向留一径流出口,布设“V”型引流槽,用于收集降雨径流,根据研究区历年降雨资料及实际情况,本试验选定雨强为 $0.42, 0.74, 1.08, 1.50 \text{ mm}/\text{min}$,在 3 种放牧草场进行降雨模拟试验,4 种雨强的均匀度经测定为 $81\%, 84\%, 85\%, 90\%$ 。每场降雨历时为产流后持续降雨 24 min ,每种放牧强度草场均进行 4 种降雨强度的降雨试验,每次试验进行一次重复,总共进行 24 场模拟降

雨试验。降雨试验为2014年夏天进行,试验期间无天然降雨,试验过程中试验小区均用塑料布围挡以避免风对试验的影响,试验开始前进行预降雨保证降雨试验过程中的土壤表层含水率基本相等。降雨试验开始后,用秒表计时,记录下产流时间,并收集全部径流,测定径流量,产流后每3 min采集一次径流样品,共采集8次,降雨过程中收集模拟雨水作为空白对照。

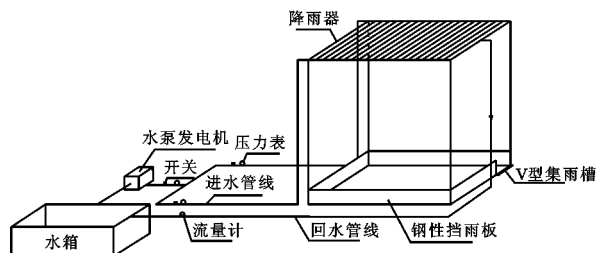


图1 降雨模拟器示意

1.3.3 指标测定 土壤样品按“X”布点法采集表层

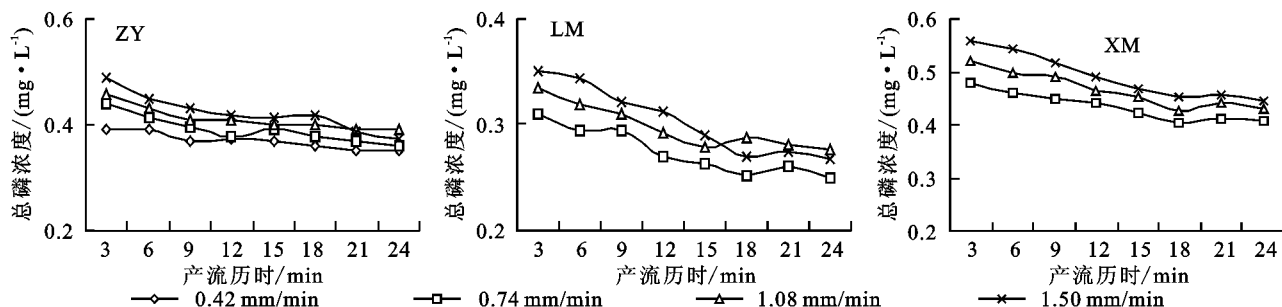


图2 不同放牧制度不同降雨强度下总磷流失过程

进一步对不同放牧草场不同降雨强度下总磷流失状况进行分析。3种放牧草场在各个降雨强度下,总磷流失过程随产流历时的增加呈现出不同的波动状态,总体显示为随降雨历时的增加,径流中总磷浓度逐渐减小,并最终达到稳定状态,流失过程曲线呈波动递减状态主要是由于降雨试验初始阶段,雨滴对地表土壤存在溅蚀作用,将表层土壤中容易流失的磷携带到径流中,随着降雨历时的增加表层土壤中易流失的磷逐渐减小所以污染物浓度逐渐降低,波动主要是野外试验区域地表磷元素分布不均匀所致。3种放牧草场在4种降雨强度下产流初期总磷流失浓度差别明显,浓度差在0.1 mg/L内变化,在产流18 min后总磷流失浓度差别变小,主要是由于降雨过程中地表表层土壤的有效混合深度是一定的,随着降雨历时的增加表层土壤中可流失的溶解态磷和吸附态磷逐渐减少,最终达到一个定值。轮牧及休牧草场总磷流失量也存在相同情况,随降雨历时的增加各降雨强度之间总磷浓度差减小,且减小用时随放牧制度变化明显。

同一放牧草场内总磷流失量随降雨强度的增加显著增大($p < 0.05$),存在显著正相关关系。3种放牧草场中,休牧草场总磷平均浓度最大,是轮牧草场的1.59倍,

0—10 cm土壤样品,含水率采用烘干法测定,土壤含水率=(烘干前重量-烘干后重量)/环刀体积,重复3次;土壤全磷测定,采用微波消解仪和紫外可见分光光度计参照硝酸—硫酸消解法(GB9837—1988)测定,重复2次;土壤有效磷测定,采用HITACHI U—2001紫外/可见光分光光度计参照钼锑抗比色法(土壤农化分析)测定,重复2次;降雨径流样品中含沙量采用过滤烘干法测定、总磷和溶解态总磷采用过硫酸钾消解—钼锑抗分光光度法,参考GB11893—1989,利用HITACHI U—2001紫外/可见光分光光度计进行测定。

2 结果与分析

2.1 总磷流失过程

3种放牧草场在0.42 mm/min的降雨强度下轮牧及休牧草场未出现产流状况,不存在磷元素的流失,其余各场降雨试验均正常产流,详见图2。

是自由放牧草场的1.16倍,自由放牧草场是轮牧草场的1.36倍。休牧草场中磷浓度较高,主要是由于休牧草场中土壤磷含量远高于轮牧及自由放牧草场,虽然降雨过程中径流量较其它放牧草场有所减少,但是由于土壤中磷元素在随径流迁移时,含磷量高的土壤迁移出的磷较多,磷元素的衰减较快,在短时间内容易释放大量的磷元素,该结论与Wu等^[15]在中国南方白菜地对土壤肥料随水土流失变化的研究结果一致。

在0.74 mm/min降雨强度下,自由放牧草场总磷流失量较休牧草场和轮牧草场分别增加了50.3%和64.1%,而休牧草场较轮牧草场的流失量增加9.1%;在1.08 mm/min与1.50 mm/min雨强下,自由放牧草场较休牧和轮牧草场的总磷流失量分别增加了31.3%,58.8%和34.4%,74.4%,休牧草场较轮牧草场的总磷流失量分别增加了21.1%和29.8%。相同降雨强度下自由放牧草场较休牧草场的总磷流失的增加量均大于休牧草场较轮牧草场的增加量。单因素方差分析显示,同一降雨强度下不同放牧草场总磷流失量差异显著($p < 0.05$)。

自由放牧草场降雨强度从0.42 mm/min增加到0.74,1.08,1.50 mm/min时,总磷累积流失量分别增加了1.34,0.75,1.20 mg,轮牧及休牧草场在降雨

强度逐渐变大的过程中,总磷累积流失量分别增加了 0.52,0.51,0.81,0.83 mg。相同雨强下 3 种放牧草场的总磷流失累积曲线的增长斜率变化:自由放牧草场>休牧草场>轮牧草场。3 种放牧草场不同降雨

强度下的总磷流失累积曲线增长斜率显示为:雨强 1.50 mm/min>雨强 1.08 mm/min>雨强 0.74 mm/min>雨强 0.42 mm/min。总磷累积流失量增长呈指数增长规律,其相关性均达 0.9 以上(图 3)。

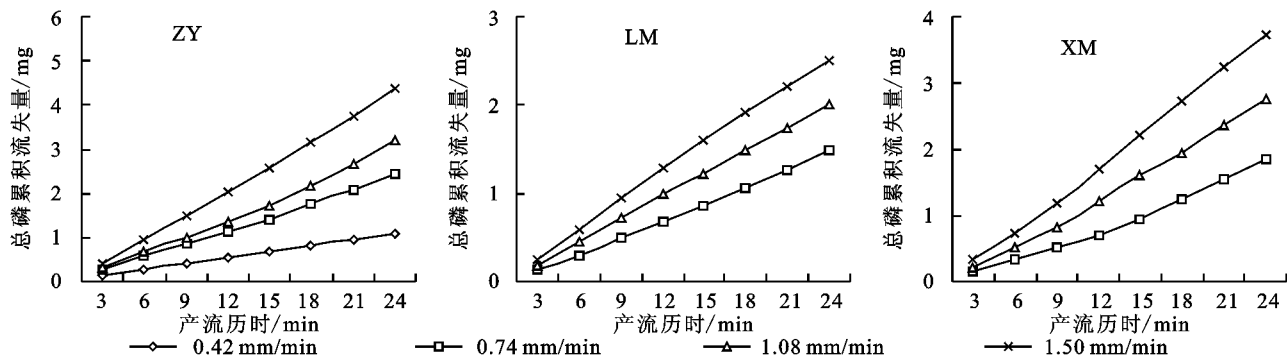


图 3 不同放牧制度不同降雨强度下总磷累积过程

3 种放牧草场中自由放牧草场流失量最大主要是由于自由放牧草场植被生长状况较差,覆盖度较小,最小仅达到 35%,与轮牧及休牧草场存在显著差异($p<0.05$)。降雨过程中表层土壤由于缺乏地表植被的保护,雨滴直接对表层土壤进行溅蚀扰动,直接对表层及下层土壤中颗粒态磷和可溶性磷产生影响,携带较多的磷元素进入径流,造成自由放牧草场总磷含量较高。休牧草场及轮牧草场由于地表植被各项指标值均高于自由放牧草场,在降雨过程中,表层植被有效的减小了降雨对土壤的溅蚀及扰动,从而减少了磷的流失,该结果与赵伟等^[12]在 2009 年在呼伦湖进行的水土流失试验的结论相同。而休牧草场总磷流失量要高于轮牧草场,主要由于径流中磷的流失量主要由径流量及磷浓度两方面决定的,在 0.74, 1.08, 1.5 mm/min 雨强下,休牧草场的径流量较轮牧草场降低了 31.0%,22.2%,18.0%^[14],径流中磷浓度增加量增大了 58.8%,56.8%,62.0%,虽然径流

量有所减少,但其浓度上升幅度较大,所以造成了休牧草场磷流失量高于轮牧草场。

2.2 溶解态磷与颗粒态磷流失过程

对 3 种放牧草场不同降雨强度下径流中溶解态磷及颗粒态磷流失过程进行分析,3 种放牧草场溶解态磷在不同降雨强度下变化规律一致,均表现为随降雨历时的增加呈减小趋势,随降雨强度的增加各放牧草场径流中溶解态磷浓度变化不显著($p>0.05$),但流失总量呈递增趋势,主要由于雨强变大径流量增加,对溶解态磷的携带能力变大。相同降雨强度下,自由放牧草场与轮牧草场径流中溶解态磷浓度差异不显著($p>0.05$),休牧草场与轮牧、自由放牧草场间溶解态磷浓度值差异显著($p<0.05$),主要由于 3 种放牧草场地表土壤磷元素含量不同,休牧草场内有效磷含量是轮牧及自由放牧草场的 1.54,1.40 倍,而轮牧草场与自由放牧草场有效磷含量较为接近,仅相差 9%(图 4)。

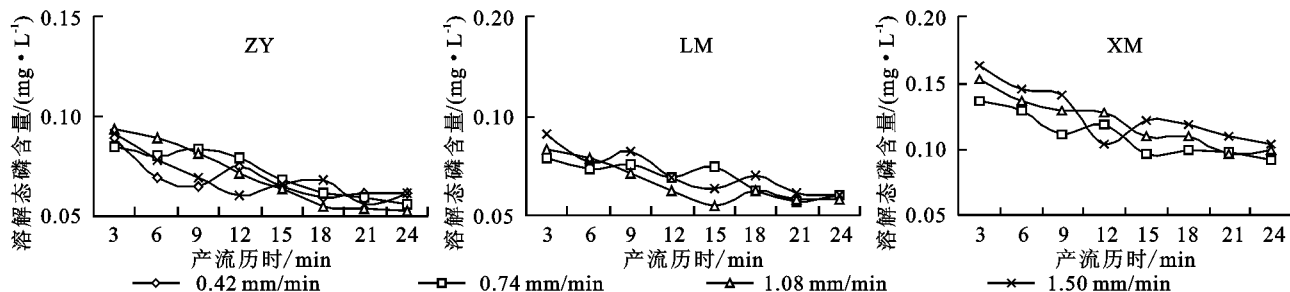


图 4 不同放牧制度不同降雨强度下溶解态磷流失过程

自由放牧草场在不同降雨强度下溶解态磷流失量比休牧草场增加了 12.9%~45.5%,而休牧草场与轮牧草场的溶解态磷流失量基本相同,其相差不超过 10%。自由放牧草场径流中溶解态磷较少,占径流中总磷的 21.4%~24.4%,并随降雨强度的增加逐渐降低,轮牧草场所占比例最高,达到 29.3%~31.2%,休牧草场所占比例为 24.7%~25.3%。自由放牧草场在各降雨事件中,颗粒态磷流失量比休牧草场增加了 37.3%~

52.0%,休牧草场比轮牧草场增加了 22.7%~41.0%。自由放牧草场在 0.43 mm/min 降雨强度下颗粒态磷占流失总磷的比例为 75.6%,当雨强增加到 1.5 mm/min 时,比例上升到 78.6%,随雨强增大径流中颗粒态磷的流失比例呈明显上升趋势(图 5)。轮牧草场径流中颗粒态磷所占比例为 68.7%~70.6%,休牧草场径流中颗粒态磷所占比例为 74.7%~75.2%,休牧草场随降雨强度的增加径流中颗粒态磷所占比例变化不大,基本保持稳

定状态。主要由于休牧草场植被生长状况较好,植被株高、覆盖度、叶面积等指标是轮牧草场的 1.5,1.3,1.6 倍,是自由放牧草场的 3.6,2.1,3.2 倍,在降雨过程中起到了良好的缓冲作用,使土壤中颗粒态磷受扰动较少,所以休牧草场颗粒磷比例基本不变。在降雨过

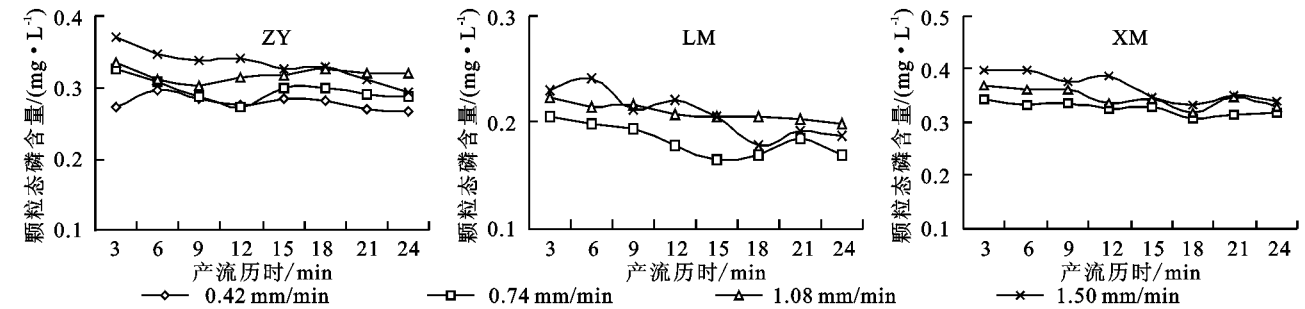


图 5 同放牧制度不同降雨强度下颗粒态磷流失过程

表 2 不同放牧制度草场径流各形态磷浓度、流失量及占全磷百分比

项目	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	ZY		LM		XM	
		水溶态磷	颗粒态磷	水溶态磷	颗粒态磷	水溶态磷	颗粒态磷
流失量/mg	0.43	0.27	0.82	—	—	—	—
	0.74	0.58	1.85	0.49	0.99	0.40	1.21
	1.08	0.69	2.49	0.58	1.42	0.61	1.81
	1.50	0.94	3.44	0.78	1.73	0.82	2.44
平均 浓度/(mg·L ⁻¹)	0.43	0.09	0.28	—	—	—	—
	0.74	0.10	0.30	0.09	0.18	0.11	0.33
	1.08	0.09	0.32	0.09	0.21	0.12	0.35
所占 总磷比例/%	1.50	0.09	0.33	0.09	0.21	0.13	0.37
	0.43	24.40	75.60	—	—	—	—
	0.74	23.97	76.03	33.08	66.92	24.77	75.23
	1.08	21.77	78.23	29.12	70.88	25.29	74.71
	1.50	21.40	78.60	31.19	68.81	25.21	74.79

2.3 基于有效混合深度模型的磷流失模拟

国内外学者对土壤溶质随径流迁移过程进行了大量的研究,并提出了各类描述土壤溶质随径流迁移的数学模型,主要有集总参数模型、混合深度模型以及溶质解析模型等,其中混合深度模型具有明确的物理意义,在各地区进行模拟实践开展较多。本研究利用混合深度模型对不同放牧制度草场土壤中磷随径流迁移的过程进行模拟。

混合深度模型分为完全混合、部分混合及不完全混合模型,Ahuja 等^[16]提出了饱和状态下的完全及不完全混合模型,饱和状态下的土壤溶质迁移特征主要显示为降雨开始就会发生产流,该模型在国外饱和土壤状态下应用较好,但对于旱半干旱地区长期处于不饱和状态水位的土壤溶质迁移模拟过程并不适用,在我国王全九等^[11]针对黄土高原地区土壤常年处于非饱和状态,对完全及不完全混合模型进行了修正,提出了适用于黄土高原地区的土壤非饱和状态下有效混合深度模型。本文应用非饱和状态下有效混合深度模型对不同放牧制度草场的磷元素流失过程进行模拟。

程中磷的流失形态主要以颗粒态磷为主,该结果与袁敏等^[10]在湘南红壤土地区所得到的观测结果一致,主要由于地表土壤中磷元素主要以难溶的迟效磷为主,溶解态磷主要存在于有效磷中,有效磷在土壤含量很低,不超过全磷含量的 0.3%(表 1)。

土壤溶液中磷元素主要以 PO_4^{3-} 、 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- 等形式存在,土壤颗粒对磷元素吸附性较强,将溶质吸附过程看做为等温线性吸附过程,考虑吸附系数 k 进行模型计算。完全混合模型认为降雨径流过程中,混合深度内土壤溶液溶质实现充分混合,有效混合深度内溶质浓度与径流溶质浓度及入渗水溶质浓度完全相同。

$$C=C_0\exp(-\frac{rt}{\text{EDI}(\theta_s+\rho_s k)})$$

式中: C 为任意 t 时刻土壤水溶质浓度(mg/L); C_0 为产流初始时刻土壤水溶质浓度(mg/L); r 为降雨强度(mm/min); t 为径流时间(min);EDI 为有效混合深度(mm); θ_s 为土壤饱和含水率(cm^3/cm^3); ρ_s 为土壤容重(g/cm^3); k 为线性吸附系数。

不完全混合模型认为降雨径流过程中,有效混合深度内的溶质一部分随地表径流迁移,另一部分随入渗水向下迁移,径流溶质浓度和入渗水溶质浓度与混合深度内溶质浓度呈一定比例关系,即浓度不同但呈线性关系。

$$bC = bC_0 \exp\left(-\frac{brt + (a-b)Q}{EDI(\theta_s + \rho_s k)}\right)$$

式中: b 为径流溶质浓度与混合层溶质浓度的比值; a 为入渗水溶质浓度与混合层溶质浓度比值; C 为任意 t 时刻土壤水溶质浓度 (mg/L); C_0 为产流初始时刻土壤水溶质浓度 (mg/L); r 为降雨强度 (mm/min); t 为径流时间 (min); Q 为土壤累计入渗量 (cm); EDI 为有效混合深度 (mm); θ_s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); ρ_s 为土壤容重 (g/cm^3); k 为线性吸附系数。

王全九等^[11]在试验过程中发现径流溶质浓度一般比混合深度内溶质浓度小很多, 因此参数 b 较小, 通过对有效混合深度模型的概化, 将模型改变为形式上更简单的 2 个参数模型, 既完全混合 $C = A \cdot \exp(-Bt)$, 不完全混合 $C = A \cdot \exp(-Bt^{0.5})$, 便于对径流溶质浓度与时间变化关系进行分析, 本文通过王全九提出的有效混合深度模型的简化参数模型, 利用 0.42, 0.74, 1.08, 1.50 mm/min 降雨强度下的 3 种放牧草场的径流试验资料对完全混合模型及不完全混合模型描述径流溶质浓度变化与时间关系进行分析。

对 3 种放牧草场不同降雨强度下土壤溶质迁移过程利用有效混合深度模型进行模拟 (图 6), 其各场降雨强度下的实测值与计算值的决定系数列表如下 (表 3), 从实测资料与模拟计算结果的配合程度看, 不完全混合模型的计算结果优于完全混合模型。自由放牧草场在不同降雨强度下模拟结果显示, 实测值与计算值的决定系数 R^2 均大于 0.8, 不完全混合模型计算值与实测值的决定系数大于完全混合模型, 达到 0.9 以上 (除 0.43 mm/min 雨强外), 在产流初期 2 种混合模型的计算结果与实测值的匹配与较好, 而在产流后期较差, 随降雨强度的增加有效混合深度模型的计算值与实测值的匹配程度总体呈增加趋势。有效混合深度模型在轮牧草场及休牧草场的模拟效果较好, 其变化趋势与自由放牧草场相同, 休牧草场混合深度模型的计算值与实测值拟合的决定系数均达到 0.9 以上, 相同降雨下的模拟效果优于轮牧及自由放牧草场。有效混合深度模型对 3 种放牧草场不同降雨强度下的土壤磷素流失过程模拟效果较好, 不完全混合模型的模拟效果优于完全混合模型。

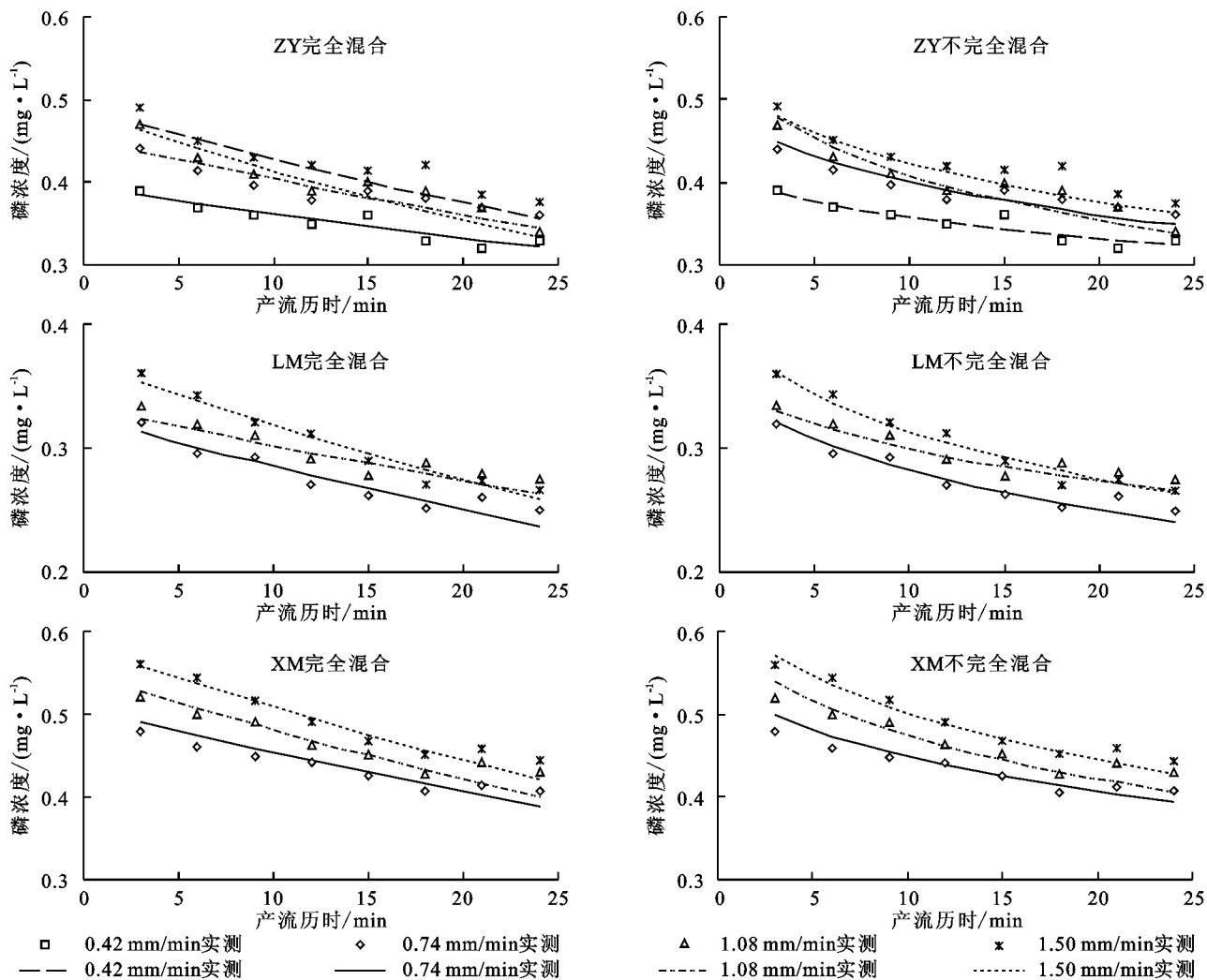


表 3 2 种模型决定系 R^2 对比

样地	模型 分类	降雨强度/(mm·min ⁻¹)			
		0.43	0.74	1.08	1.5
ZY	完全	0.8075	0.8781	0.8983	0.8951
	不完全	0.8807	0.9200	0.9170	0.9262
LM	完全	—	0.8883	0.8741	0.9602
	不完全	—	0.9371	0.9253	0.9724
XM	完全	—	0.9343	0.9213	0.9459
	不完全	—	0.9583	0.9400	0.9668

3 讨论

草原砂质土壤磷的流失过程受到多种因素的影响,例如土壤磷含量、植被生长状况、土壤理化特性、土壤侵蚀状况等。而放牧制度看似对磷素的流失没有直接关系,但从各个方面间接地影响着磷素的迁移过程,不同的放牧制度对植被的生长状况产生直接影响,载畜量的多少改变表层土壤的物理结构,植被的生长状况又直接影响着土壤磷元素的状况,以及降雨过程中土壤的侵蚀程度。

关于呼伦贝尔草场放牧活动对土壤侵蚀的影响研究较少,仅有赵伟等^[12]、韩佩江等^[17]对不同降雨条件下放牧草场的水土流失状况进行了研究,但均未对不同形态的磷流失状况的差异性进行分析,本文在其研究基础上,针对呼伦贝尔草原现行的放牧方式,选取 3 种放牧草场,根据多数放牧草场的载畜量,设计放牧强度并进行降雨模拟试验,针对放牧过程对不同形态磷的流失进行探讨。本文试验结果总体趋势与前人研究结果相同,但部分内容略有不同,主要是区别在与赵伟等^[12]认为,不放牧草场的磷流失量最小,其流失的形态主要为颗粒态磷,本研究认为轮牧草场的磷流失量最小,造成本区别的主要原因是 2 次试验地点并不相同,放牧草场地表的总磷含量区别显著,赵伟等选取的不放牧草场中土壤磷含量为 0.25 g/kg 仅为传统放牧草场及草库伦草场的 1/2,本研究中不放牧草场的磷含量为 0.84 g/kg,两者含量差异较大。

自由放牧草场径流中磷含量随降雨强度的增加显著($p<0.05$),而浓度增加不显著($p>0.05$),休牧及轮牧草场径流中磷含量及浓度变化随降雨强度的增加而增加明显。产生该现象的原因主要是由于地表土壤中磷元素含量不同造成的。自由放牧草场表层土壤中含磷量较少,而休牧及轮牧草场表层土壤中磷含量较大,磷流失过程中磷含量的多少是影响磷流失的主要因素。该结果与 Dodd 等^[18]、Wu 等^[15]的研究结果一致,Dodd 等认为影响地表溶质迁移过程的因素主要有降雨能量、径流以及土壤中磷元素含量,受土壤理化性质的影响较少,Wu 等在中国南方白菜地进行降雨径流对土壤溶质流失影响的研究也得出了相同结论。

利用有效混合深度模型对 3 种放牧草场在不同降雨强度下土壤磷的迁移过程进行模拟,结果显示产流初期有效混合深度的 2 种混合模型计算结果与实测值的匹配较好,而在产流后期较差,该结果与王全九等^[11]利用有效混合深度模型对黄土坡面土壤溶质随径流迁移过程的模拟结果呈相反趋势,主要由于王全九等在室内利用壤土进行室内降雨模拟试验,其土壤磷含量及其它边界条件较好控制,且降雨时间较长达到 90 min,其径流溶质初始含量较高是径流稳定状态的 3~4 倍,而本文在呼伦贝尔草原砂质草场进行野外降雨模拟试验,土壤磷含量无法保证均匀一致,且土壤溶质含量较低,初始径流溶质含量与稳定径流相差较小,产流后期出现波动,降雨时间仅为产流后 24 min,所以导致后期拟合效果较差。

4 结论

(1)3 种放牧草场在相同降雨强度下径流中总磷流失量为自由放牧草场>休牧草场>轮牧草场。自由放牧比休牧草场增加了 31.1%~50.3%,休牧比轮牧草场增加了 9.1%~29.8%,轮牧草场磷元素流失的减少效果要整体优于休牧及自由放牧草场。

(2)3 种放牧草场地表径流中磷素的主要流失形式为颗粒态磷,颗粒态磷的含量约为溶解态磷的 2.2~3.7 倍,自由放牧草场颗粒态磷流失最多,轮牧草场溶解态磷流失量最大。颗粒态磷的流失容易引起水体的二次污染,对呼伦贝尔草原而言,适当的减小自由放牧制度草场的面积对流域湖泊水环境保护及营养元素污染控制都具有重要的意义。

(3)利用有效混合深度模型的简化模型对 3 种放牧草场不同降雨强度下土壤磷素迁移过程进行模拟,结果显示不完全混合模型更适合模拟土壤磷素流失过程。

参考文献:

[1] 余新晓,毕华兴.水土保持学[M].北京:中国林业出版社,2013:2-47.

[2] 史静,卢湛,张乃明.混播草带控制水源区坡地土壤氮磷流失效应[J].农业工程学报,2013,29(4):151-156.

[3] 刘晓君,李占斌,宋晓强,等.土石山区不同农作方式下坡面径流氮素流失过程[J].水土保持学报,2015,29(1):80-84.

[4] Wang Y Q,Zhang X C,Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma,2009,150(1/2):141-149.

[5] 张向炎,史学正,于东升,等.前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J].水科学进展,2010,21(1):23-29.