

不同放牧强度对流域降雨径流中氮磷流失的影响

韩佩江¹, 李卫平¹, 于玲红¹, 桂满全², 杨文焕¹, 殷震育¹, 陈阿辉¹, 樊才睿³

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014000; 2. 内蒙古达赉湖国家级自然保护区管理局, 内蒙古 海拉尔 021000; 3. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018)

摘要:在呼伦贝尔草原克鲁伦河流域选取轻度放牧、重度放牧及不放牧草场, 利用降雨模拟器进行降雨模拟试验, 研究了不同放牧强度草场的地表物理性质、植被类型对降雨产流、营养元素流失等因素的影响。结果表明: 在 20, 45, 65 mm/h 降雨强度下重度放牧草场产流时间最短, 不放牧草场产流时间最长。径流量及径流系数总体规律显示为重度放牧草场 > 轻度放牧草场 > 不放牧草场。3 种放牧强度草场的氮磷流失量均随雨强的增加而增大。降雨产流初期氮磷浓度相对较高, 随径流时间增加逐步下降, 最后达到稳定。径流量与氮磷含量之间存在二项式显著相关关系。

关键词:不同放牧强度; 氮; 磷; 水土流失; 降雨模拟

中图分类号: S153.6; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0008-05

Effects of Different Grazing Systems on Nitrogen and Phosphorus Losses Along the Rainfall Runoff

HAN Peijiang¹, LI Weiping¹, YU Linghong¹, GUI Manquan²,
YANG Wenhuan¹, YIN Zhenyu¹, CHEN Ahui¹, FAN Cairui³

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. Hulun Lake National Nature Reserve Bureau, Hailar, Inner Mongolia 021000, China; 3. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: A rainfall simulator was used to determine the influence of the surface physical properties and vegetation types as well as three systems of grazing (light, heavy and no grazing) on the rainfall infiltration and runoff yield in pastures in the Kherlen basin of Hulun Buir. The results showed that, under three rainfall intensities; 20, 45, 65 mm/h, the runoff duration in the heavy grazing pasture was the shortest, while runoff duration in the no grazing pasture was the longest. The runoff volume and runoff coefficient showed a general trend: heavy grazing pasture > light grazing pasture > no grazing pasture. As the rainfall intensity increased in the three grassland grazing systems, the losses of nitrogen and phosphorus from these systems also increased. The levels of nitrogen and phosphorus in the initial rainfall runoff were quite high, and then declined gradually and tended to become stable with the increase of runoff duration. There was a significant binomial correlation between runoff volume and the levels of nitrogen and phosphorus in runoff.

Keywords: different grazing system; nitrogen; phosphorus; soil and water loss; rainfall infiltration

水土流失是自然资源破坏的主要发生形式, 而流失过程中所携带的泥沙、氮、磷等营养元素更是造成水体富营养化的主要污染途径之一^[1-4], 降雨作为引发水土流失的主要发生因素之一, 对环境水土污染产生要重要的影响, 因此降雨径流中土壤及氮、磷元素迁移规律及流失特征研究对防治面源污染、缓解水体富营养化具有重要的理论及现实意义^[5-7]。目前国内外学者对水土径流损失的研究手段主要有两种: 一种

是通过长时间的野外实际观测与定量分析, 建立地表径流量与氮、磷含量的关系^[8]; 另一种是通过降雨试验模拟器, 在野外或室内进行人工降雨试验, 获取相关试验参数^[9]。国内外许多学者对径流中氮磷流失规律进行了研究, 得出不同土地利用方式及其覆被情况下土壤流失和氮磷元素流失的程度, 合理的土地利用方式及较好覆被状况具有明显减少水土流失的效果^[10-15]。但大多数研究主要集中在温带地区农田及

人工林地、草地^[16-18],对于天然草地不同使用状况的水土流失研究较少,而针对寒旱区草原土壤及氮、磷流失状况的研究更为少见。

呼伦贝尔草原位于内蒙古自治区东北部,是世界现存面积最大的天然草原。克鲁伦河流域草原地处呼伦贝尔草原的核心区,作为呼伦贝尔草原的主要组成部分,在呼伦贝尔草原的生态重要性是无可替代的,克鲁伦河作为呼伦湖的主要补给水源之一,对草原民族的繁衍生态提供着便利,对保护我国北方鸟类迁徙以及繁衍的生态安全,促进经济社会又好又快发展起到了不可忽视的作用。

本文以内蒙古呼伦贝尔草原的核心区克鲁伦河流域草原为研究对象,在该区域选取轻度放牧、重度放牧以及不放牧的 3 种放牧强度草场,进行野外降雨模拟试验,通过对试验过程中产流、产沙以及氮磷元素的定量分析,得到不同放牧强度对土壤及营养元素流失特征的影响,为呼伦湖流域草原的合理开发利用、水体环境的保护提供基础资料。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

克鲁伦河(Kherlon River)发源于蒙古共和国肯特

山东麓,自西向东流经过肯特省和东方省的广阔草原,经新巴尔虎右旗克尔伦苏木乌兰恩格尔西端进入我国境内,经阿拉坦额莫勒镇东流注入呼伦湖。全长 1 264 km,境内长约 206 km,流域面积 92 000 km²,国内面积 5 486 km²[19]。克鲁伦河流域(国内部分)地处欧亚大陆东南端中高纬度地带,属温带大陆型气候,四季分明,多风少雨,冬长夏短,冷热变化剧烈。全年平均风速 4.2 m/s,年均日照时数 3 100 h,多年平均气温 0.5℃,无霜期 128 d,多年平均降雨量 245.00 mm,年均蒸发量 1 873.5 mm,年温差达 70~80℃,存在季节性冻土^[19]。

1.2 样地设置与样品采集

本研究工作试验区选取在新巴尔虎右旗阿拉坦额莫勒镇附近的其其格勒嘎查,其位置为 116°51'35"E, 48°36'13"N,在该区域草场选取轻度放牧、重度放牧、不放牧的 3 种放牧强度草场。于 2014 年 7 月下旬在不同放牧强度进行野外降雨模拟试验,测定草地表层 0—20 cm 土壤的理化性质指标含水率、全氮、全磷、pH 等(表 1)。采用随机采样法(1 m×1 m 的样方)采集植被样品,测定其植被高度、种密度等指标。确定该区域的主要优势植物为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、虎尾草(*Chloris virgata* Sw.)等植被。

表 1 试验区基本状况

样地类型	植被高度/cm	种密度/(株·m ⁻²)	土壤含水率/%	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	pH
轻度放牧	22.5	339	10.35	2.65	0.714	8.201
重度放牧	12.5	213	12.32	2.83	0.692	8.375
不放牧	37.0	594	9.76	1.51	0.722	8.422

1.3 试验设计

根据研制的降雨模拟器的实际精度,在轻度放牧草场、重度放牧草场、不放牧草场,选取 3 种降雨强度:20,45,65 mm/h;在每种放牧强度草场分别进行 3 种雨强的降雨模拟试验,每场进行 2 次重复试验,共进行 18 场降雨模拟试验,区域坡度分布在 4°~5°,降雨试验设计见表 2。

表 2 降雨模拟试验设计表

降雨场次	坡度/(°)	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	放牧强度	持续时间/min	重复次数/次
1	4.0	20	轻度放牧	30	2
2	4.5	20	重度放牧	30	2
3	4.0	20	不放牧	30	2
4	5.0	45	轻度放牧	30	2
5	4.0	45	重度放牧	30	2
6	5.5	45	不放牧	30	2
7	4.5	65	轻度放牧	30	2
8	4.5	65	重度放牧	30	2
9	5.0	65	不放牧	30	2

降雨模拟器主要由水箱、动力系统(发电机和水泵)、输送管线、回流管线、降雨器等组成,降雨器是由均

匀布满小孔的 PPR 管构成,呈竖状排列^[20]。首先由水泵将水经管线输送到降雨器内部产生雨滴,然后调节输送流量使降雨强度达到要求,降雨模拟器的有效降雨面积为 2 m×1 m 的矩形径流小区域,在径流小区域边界用铁板嵌入地表包围,仅在下坡向留一出口,确保降雨过程中产生的径流全部从出口流出,流入集水槽内。

试验开始后,用秒表计时,记录产流时间,产流后每 3 min 取一次径流水样,用量筒测定其体积后,装入水样瓶,带回实验室测定总氮(参照 GB11894—1989 的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、总磷(参照 GB11893—1989 的钼酸铵分光光度法)、pH 值(采用玻璃电极法测定,参考 NY/T1121.2—2006)、泥沙含量(采用烘干称重法测定)等指标。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度草场径流量特征

由表 3 可知,在 3 种放牧制度草场进行降雨模拟试验,轻度放牧和不放牧草场的试验区在 20 mm/h 的雨强下,未产生径流,主要是由于轻度放牧草场和不放牧草场植被生长状况较重度放牧草场差异非常

显著($p < 0.01$),重度放牧草场植被稀疏对降雨的拦截作用较小,容易产生径流。在 45,65 mm/h 两种降雨强度下,重度放牧草场产流时间最短,不放牧草场产流时间最长,在 45 mm/h 时,重度放牧草场的径流量是轻度放牧草场及不放牧草场的 1.46,1.79 倍,在 65 mm/h 时产流量是 1.45,1.72 倍,表明雨强的增加对径流量的大小具有极显著的正效应,在降雨强度增大时,降雨速度增加,相同时间内到达地表的降雨

表 3 不同放牧强度草场产流特征

样地类型	雨强/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/min	径流量/ml	产流时间/min	径流系数
重度放牧	20	31.27	1860	13.27	0.093
	45	30.86	4810	12.86	0.107
	65	30.30	7270	10.24	0.112
轻度放牧	45	30.01	3295	13.31	0.073
	65	30.50	5030	11.47	0.077
不放牧	45	33.50	2685	14.94	0.060
	65	30.50	4230	12.35	0.065

3 种放牧强度草场径流系数总体规律为:重度放牧草场>轻度放牧草场>不放牧草场。主要是由于重度放牧草场植被生长状况较差,表层土壤的团粒稳定性结构差,降雨后地表产生结皮现象,表层土壤含水率饱和,减小降雨入渗率,不放牧草场和轻度放牧草场植被生长状况较好,植被生长状况有效地减少了雨水到达地表的动能,减缓地表结皮,加之表层土壤有机质含量较高,土壤持水性能较好^[14],有利于土壤水分入渗^[17]。对 3 种放牧强度各雨强下的径流系数进行方差分析及显著性分析,可以看出:各种雨强下的径流系数差异显著($p < 0.01$),放牧强度与径流系数的大小存在极显著的正效应,相同雨强下随着放牧强度的增加,径流系数呈明显的增加趋势,其变化趋势与径流量变化相同。

水体富营养化污染主要是由于降雨过程中径流所携带的氮、磷营养元素造成的。通过试验发现 3 种放牧草场的降雨产流过程均为径流量先增加后达到稳定状态,由图 1 可以看出,重度放牧草场开始产流时流量增加较快,经过一段时间后流量趋于稳定,不同降雨强度对产流时间存在一定影响,20 mm/h 雨强下重度放牧草场产生径流的稳定时间明显小于 45,65 mm/h 雨强。3 种放牧强度草场在 45,65 mm/h 雨强下的产流稳定时间略有不同(图 2),在 45 mm/h 雨强下,重度放牧草场和不放牧草场从产流后 9~12 min 开始稳定产流,轻度放牧草场从产流后 12~15 min 开始稳定产流,产流后差异不显著($p > 0.05$),重度放牧草场产流开始流量增加较快,是轻度放牧草场和不放牧草场的 2.08,2.47 倍;在 65 mm/h 雨强下,重度放牧草场和不放牧草场从产流后 12~15 min 开始稳定产流,稳定产流差异不显著($p > 0.05$),轻度放牧草场

量变大,导致在土壤实际入渗能力恒定的情况下,透水性下降,降雨转换为地表径流。

对 3 种放牧强度相同雨强下的径流量进行方差分析及显著性分析,可以看出,各种雨强下 3 种放牧草场间径流量差异极显著($p < 0.01$),放牧强度与径流量的大小存在极显著的正效应($p < 0.01$),相同雨强下随着放牧强度的增加,径流量呈明显的增加趋势,重度放牧草场的径流量明显高于较轻度及不放牧草场($p < 0.01$)。

未达到稳定产流,重度放牧草场产流增加速率是轻度放牧草场和不放牧草场的 2.07,3.73 倍,轻度放牧草场是不放牧草场的 1.79 倍。降雨产流特征不但与降雨特征密切相关,还与植被生长状况及表层土壤特性相关,植被覆盖密度大的区域水土流失相对较小。重度放牧草场由于常年过度放牧,植被稀疏,导致其水土流失较为严重。

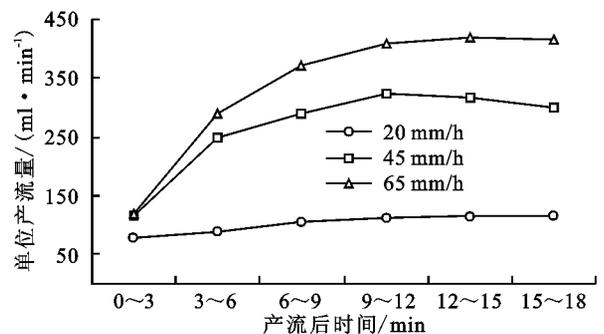


图 1 重度放牧草场 3 种雨强产流过程曲线

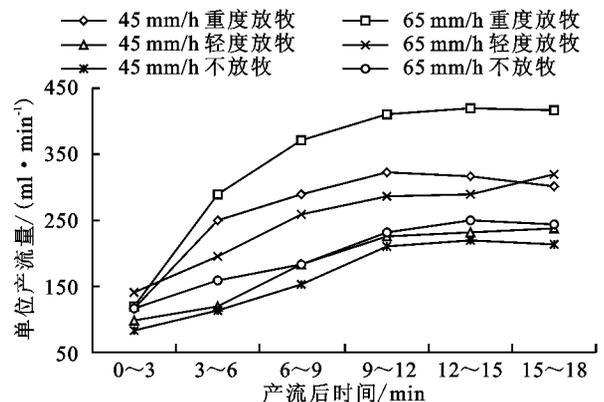


图 2 不同雨强下 3 种放牧制度草场产流过程曲线

2.2 不同放牧制度草场氮磷流失特征

3 种放牧制度草场的氮磷流失量均随雨强的增加而增大,对各雨强下 3 种放牧草场降雨过程中的氮

磷流失量进行方差分析及显著性分析,由表 4 可以看出:各种雨强下 3 种放牧草场间氮、磷流量及流失负荷差异极显著($p < 0.01$),相同雨强下放牧强度对氮、磷元素的流失量影响显著,重度放牧草场的氮、磷流失量明显高于其他两种放牧草场($p < 0.01$),而轻度放牧草场的氮、磷流失量略高于不放牧草场($p < 0.05$),没达到极显著水平。主要是由于 3 种放牧强

度草场的总磷含量相差不大,重度放牧草场和轻度放牧草场表层土壤的总氮含量差异一般显著($p < 0.05$),而与不放牧草场的差异非常显著($p < 0.01$)。降雨过程中由于重度放牧草场的植被稀疏,降雨对地表土壤冲刷严重,径流中携带的泥沙较多,造成重度放牧草场氮磷流失量较大,而轻度放牧及不放牧草场中地表植被对降雨起到一定的缓冲作用。

表 4 不同放牧强度草场氮磷流失特征

样地类型	雨强/ (mm · h ⁻¹)	总氮浓度/ (mg · L ⁻¹)	总氮流失负荷/ (mg · m ⁻²)	总磷浓度/ (mg · L ⁻¹)	总磷流失负荷/ (mg · m ⁻²)	pH
重度放牧	20	0.911	0.773	0.357	0.310	8.075
	45	1.485	3.395	0.405	0.935	8.055
	65	1.599	4.452	0.390	1.093	8.123
轻度放牧	45	1.355	1.910	0.350	0.546	8.207
	65	1.389	3.204	0.368	0.731	8.201
不放牧	45	1.201	1.678	0.338	0.470	8.286
	65	1.211	1.978	0.351	0.590	8.241

由图 3 可以看出,降雨产流初期总氮、总磷浓度相对较高,但随着径流时间的推移,氮、磷浓度呈下降趋势,最后达到稳定。各雨强下径流中总氮、总磷流失过程显示为波动式下降,总氮的流失过程较总磷流失波动更为剧烈。主要由于降雨开始产流时,降雨侵蚀土壤表层,将土壤表层中容易流失的可溶性氮、磷营养元素携带在径流中,导致初期降雨径流的氮、磷浓度较高,降雨产流的后,降雨的侵蚀作用及稀释作用并存导致径流中氮、磷浓度逐渐下降,呈波动式起伏,主要由于地表氮、磷元素分布不均造成径流中

氮磷元素浓度的变化较大。总磷流失中,20 mm/h 雨强下的重度放牧草场和 45 mm/h 雨强下轻度放牧草场流曲线较为平缓,65 mm/h 雨强下的重度放牧草场和轻度放牧草场的流失曲线较为陡峭。总氮流失中,45 mm/h 雨强下轻度放牧草场流失曲线较为平缓,65 mm/h 雨强下的重度放牧草场的流失曲线较为陡峭。通过对重度放牧草场 3 种降雨强度的氮磷流失过程对比,可以看出降雨强度的增加可以明显增加对土壤氮磷流失的贡献,但对流失的变化趋势不产生影响。

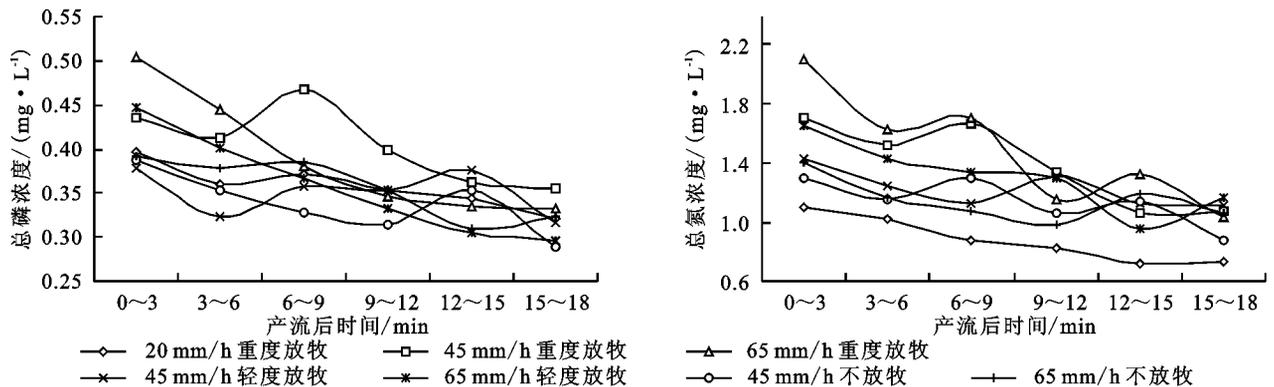


图 3 3 种放牧制度草场氮磷流失过程曲线

如表 5 所示,分别对 3 种放牧制度草场的径流量及氮、磷含量进行线性方程、指数方程及二项式方程拟合,结果表明径流量与氮磷含量间进行二项式拟合效果最好,决定系数最高, R^2 均达到 0.7 以上,线性拟合稍差,指数拟合效果最差。氮、磷含量与径流量之间存在显著相关关系,符合二项式相关。3 种放牧草场的总氮流失方程的相关性为:重度放牧草场 < 轻度放牧草场 < 不放牧草场;总磷流失方程的相关性显示与总氮完全相反,可以看出重度放牧草场对总磷的流失影响最为严重,而对总氮的影响相对最小,不放

牧草场对总磷影响最小,对总氮影响较大。同时用 2013 年 8 月进行的降雨模拟试验数据对模型进行验证,结果表明:重度放牧草场的实测值与模拟值的相对误差为 11%,轻度放牧草场实测值与模拟值的相对误差为 7%,不放牧草场的实测值与模拟值的相对误差为 13%,可以看出模型的实际模拟效果较好,与野外试验过程中的实际观测氮、磷含量基本一致。模型基本可以实现呼伦贝尔草原克鲁伦河流域污染物的降雨径流预测,为保护呼伦贝尔草原生态环境,监测降雨过程中面源污染提供了基础数据。但该模型

只能应用于呼伦贝尔克鲁伦河流域地区,在我国其他地区研究人员通过试验得到该区域的经验方程,研究结果显示各区域的经验方程各有不同,主要是由于面

源污染物的排放与该地区的土壤理化指标、植被类型及生长状况、土地利用方式密切相关。所以该经验方程只能利用在相似条件下的降雨产流分析。

表 5 3 种放牧草场径流量与氮磷浓度回归分析

样地类型	污染物	回归方程	R^2	p
重度放牧	总氮	$y = -0.1049x^2 + 0.1253x + 0.3671$	0.711	<0.05
	总磷	$y = 1.8218x^2 - 2.9133x + 1.1704$	0.763	<0.05
轻度放牧	总氮	$y = -0.1718x^2 + 0.3805x + 0.0229$	0.713	<0.05
	总磷	$y = 2.2373x^2 - 2.7997x + 0.9363$	0.707	<0.05
不放牧	总氮	$y = -0.3094x^2 + 0.5687x - 0.0447$	0.716	<0.05
	总磷	$y = -11.985x^2 + 7.0166x - 0.8013$	0.705	<0.05

3 结论

(1) 在 3 种放牧制度草场进行降雨模拟试验,重度放牧草场产流时间最短,不放牧草场产流时间最长。径流量及径流系数总体规律为重度放牧草场>轻度放牧草场>不放牧草场,3 种放牧草场的降雨产流过程均为径流量先增加后达到稳定状态,重度放牧草场开始产流时流量增加较快,经过一段时间后流量趋于稳定,重度放牧草场由于常年过度放牧,植被稀疏,导致其水土流失较为严重。

(2) 3 种放牧制度草场的氮、磷流失量均随雨强的增加而增大。相同雨强条件下,氮、磷流失量为重度放牧草场>轻度放牧草场>不放牧草场。总氮、总磷流失过程为降雨产流初期总氮、总磷浓度相对较高,随径流时间的推移,氮、磷浓度呈下降趋势,最后达到稳定。雨强的增加可以增大对氮、磷流失的贡献,但不影响流失规律。

(3) 氮、磷含量与径流量之间存在显著相关关系,符合二项式相关,且相关性较好,通过验证模型的模拟效果较好,与野外试验过程中的实际观测氮磷含量基本一致。

参考文献:

[1] 焦平金,王少丽,许迪,等. 次暴雨下作物植被类型对农田氮磷径流流失的影响[J]. 水利学报,2009,40(3):296-302.

[2] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报,2008,24(4):290-295.

[3] Carpenter C R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*,1998,8(3):559-568.

[4] 成杰民,宋涛,李彦. 基于 GIS 的南四湖沿岸农业面源氮磷负荷估算研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):284-288.

[5] 徐爱兰,王鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):1106-1111.

[6] Ventura M, Scandellari F, Ventura F, et al. Nitrogen balance and losses through drainage waters in an agricultural watershed of the Po Valley[J]. *European Journal of Agronomy*,2008,29(2):108-115.

[7] 沈连峰,苗蕾,韩敏,等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报,2012,24(4):77-80.

[8] Kwong K F N K, Bholah A, Volcy L, et al. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002,91(1):147-157.

[9] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报,2007,27(11):4576-4582.

[10] 吴希媛,张丽萍,倪含斌,等. 青山湖流域不同地表覆盖降雨径流中氮磷流失过程研究[J]. 水土保持学报,2008,22(1):56-59.

[11] 袁东海,王兆骞,陈欣,等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报,2003,23(1):188-198.

[12] 蒋锐,朱波,唐家良,等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. 水利学报,2009,39(6):659-666.

[13] Lang R D. The effect of ground cover on surface runoff from experimental plots[J]. *Journal of Soil Conservation Service of New South Wales*,1979,35:108-114.

[14] Butler D M, Franklin D H, Ranells N N, et al. Ground cover impacts on sediment and phosphorus export from manured riparian pasture[J]. *Journal of Environmental Quality*,2006,35(6):2178-2185.

[15] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报,2007,27(2):326-331.

[16] 王桂苓,马友华,孙兴旺,等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2):6-10.

[17] 喻定芳,戴全厚,王庆海,等. 北京地区等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失效果研究[J]. 水土保持学报,2010,26(6):11-15.

[18] 孙莉英,蔡强国,陈永生,等. 东北典型黑土区小流域水土流失防治体系[J]. 水土保持研究,2012,19(3):36-41.

[19] 邢苒苒,王文华,邢子丰,等. 克鲁伦河流域水文特性分析[J]. 内蒙古水利,2011(1):49-50.

[20] 樊才睿,李畅游,贾克力,等. 不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留研究[J]. 生态学报,2015,35(14):1-13.