

春季解冻期棕壤坡面磷素迁移过程研究

李婧楠, 周丽丽, 米彩红, 马世伟, 邵婧宇

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要:春季解冻期土壤季节性冻融发生最为强烈, 极易发生土壤侵蚀, 也是磷素流失的关键时期。采用人工模拟降雨的方法, 探究春季解冻期不同磷素背景值坡面产流产沙及磷素流失动态过程。结果表明: 产流后 14 min 内径流量和泥沙量均呈现较好的线性分布, 径流相关系数为 0.969, 泥沙相关系数为 0.936; 14~18 min 内径流量缓慢增加, 从 18 min 开始一直到产流结束径流量基本保持在 3 100 ml/min, 而泥沙则总体呈现先增大再减小的趋势; 土壤背景值 (APb) 越高, 径流、泥沙中磷浓度越高; 径流中磷素流失比率均值 APb_{20} 坡面最大, 且随着背景值的增大呈减小趋势; 而泥沙中磷素流失比率均值变化则与径流不同, APb_{40} 的坡面其流失比率最小, 其他坡面差异较小; 径流中磷素流失量与泥沙中磷素流失量呈线性关系, $y=6.751x-0.628 (R^2=0.958)$ 。

关键词:春季解冻期; 人工降雨; 磷素迁移

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0055-05

Process of Phosphorus Loss in the Spring Thaw Period on Brown Soil Slope

LI Jingnan, ZHOU Lili, MI Caihong, MA Shiwei, SHAO Jingyu

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Freeze-thaw is intense in the spring thaw period, soil erosion and phosphorus migration always happen frequently. In this study, rainfall simulation experiment was carried out on the slopes with different phosphorus (P) background values during the spring thaw period to study the dynamic processes of runoff, sediment yield and loss of P. The results showed that in the first 14 min, runoff and sediment presented the good linear distribution, the coefficients of correlation of runoff and sediment yield were 0.969 and 0.936, respectively, and then increased slowly in 14~18 min, runoff maintained its quantity of 3 100 ml/min until the end, while sediment yield generally increased first and then decreased. The higher soil background values are (APb), the higher concentrations of P are in the runoff and sediment; the average ratio of P loss of the APb_{20} slope was the largest in runoff, and showed a decrease trend with the increase of APb value; while the average rate of P loss of APb_{40} slope was minimum, and there were little differences between other slopes; P in runoff and sediment had good linear relationship, and the fitting equation is $y=6.751x-0.628 (R^2=0.958)$.

Keywords: spring thaw period; artificial rainfall; phosphorus migration

春季解冻期是土壤季节性冻融发生最为强烈时期。多次的冻融交替使土壤反复胀缩, 土壤颗粒重新排列, 严重破坏土粒间的粘结力, 使土体结构松散, 抗侵蚀能力下降^[1]。同时由于解冻期土壤中固态冰晶融化为液相水, 导致养分极易析出, 为养分流失提供丰富来源^[2]。磷是植物生长的必需元素之一, 同时也是引起非点源污染重要限制性因子^[3-4]。在我国东北地区春季融雪及降水极易造成强烈土壤侵蚀, 磷素也

随地表径流和泥沙在解冻期大量流失。周旺明等^[5]通过研究得出, 冻融作用使土壤中的总磷、磷酸根浓度和土壤流失量有着明显增加, 从而说明了冻融促使土壤淋溶溶液磷的浓度有所增加进而导致的磷元素流失。降雨则为坡面水沙携带磷素迁移流失提供了动力条件^[6]。已有研究表明^[7-8]尽管春季解冻期降雨量不大, 但由于该时期土壤抗蚀性低, 使得降雨对土壤坡面有着较强的侵蚀能力^[9], 进而造成大量磷流

收稿日期: 2016-04-16

修回日期: 2016-05-13

资助项目: 国家自然科学基金(41471225); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划(2014054); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013074)

第一作者: 李婧楠(1992—), 女, 辽宁省宽甸满族自治县人, 硕士, 主要研究方向: 土壤侵蚀、流域治理。E-mail: 1091831746@qq.com

通信作者: 周丽丽(1979—), 女, 黑龙江宾县人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与流域治理等方面的研究。E-mail: zhoulilia@163.com

失。由于作物吸收、人为管理等不同,土壤磷素含量也大有不同,目前尚缺少不同磷背景值下解冻期土壤磷素流失规律的研究。东北地区是我国重要粮食生产基地,季节性冻融作用明显,本研究以降雨为侵蚀营力,探究春季解冻期不同磷素背景值棕壤坡面产流、产沙以及磷素输出的过程,为东北地区粮食安全保障和生态环境保护提供重要的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤取自辽宁省沈阳市天柱山(41°N,123°58'E),土壤类型为棕壤。年平均气温与降雨量分别为8.1℃和680.3 mm,最大冻融深度为148 cm,年无

表1 供试土样的理化性质

土壤类型	总磷	速效磷	pH 值	容重	有机质	饱和含水率
棕壤	370 mg/kg	17.9 mg/kg	6.84	1.35 g/cm ³	2.08%	37.85%

降雨模拟装置采用下喷式人工模拟降雨器,降雨强度设为1.0 mm/min。记录产流时间,产流后每1 min接一次径流,历时30 min。但是为保证试验结果可靠性,各不同磷背景值小区均设置3次重复,进行1次降雨试验。试验结果为3个小区结果平均值,且平行试验结果最大相对误差小于6%。试验后,用量筒测定径流量,泥沙样则放在避光且通风良好处自然风干、称重。径流中的总磷采用HNO₃—HClO₃—消解钼锑抗比色法,泥沙中速效磷采用0.5 mol/L的NaHCO₃—钼锑抗比色法测定。测定结果均采用3次重复(误差不超过5%)平均值。

径流中总磷流失比率(NTP)=径流总磷浓度(CTP)/坡面磷背景值(APb)

泥沙中速效磷流失比率(NAP)=泥沙中速效磷浓度(CAP)/坡面磷背景值(APb)

径流中总磷流失量(L_{TP})=径流量(R)×径流中总磷浓度(CTP)

泥沙中的速效磷流失量(L_{AP})=泥沙流失量(A)×泥沙中速效磷浓度(CAP)

2 结果与分析

2.1 地表产流产沙过程

地表产流产沙过程见图1,坡面产流产沙过程均值回归分析见表2。由于产流后14 min内降雨强度恒定,部分降雨来不及入渗,因此坡面径流量迅速增大^[10];各小区径流量呈现较好的线性分布,其相关系数达到0.969。14~18 min内随着降雨历时的增加,入渗量逐渐减小,土壤含水量增大,降雨转化成径流

霜期为149 d。成土母质是黄土性黏土及淤积物。其基本物理性质及养分组成见表1。

1.2 试验方法

设计6个不同速效磷背景值(APb)径流小区处理,分别为20 mg/kg(APb₂₀),40 mg/kg(APb₄₀),60 mg/kg(APb₆₀),80 mg/kg(APb₈₀),100 mg/kg(APb₁₀₀),120 mg/kg(APb₁₂₀)。径流小区尺寸为3.8 m×1.0 m×0.15 m,填土厚度为0.1 m,为保证填土均匀,按1 cm为一层,分10层填土,小区设计土壤容重为1.35 g/cm³,调解土壤含水率约为饱和含水率的50%。计算各层所需的装土量,边填充边压实。装土完成后,用塑料膜覆盖好以减小含水率的变化。坡度设为8°。降雨前小区处于解冻状态。

的比例增大,使得土壤的水分逐渐达到饱和,因此该时期水分的入渗比较缓慢径流量缓慢增加。该时段流量同样呈现较好的线性分布,其相关系数达到0.987。从18 min开始一直到产流结束其径流量基本保持在3 100 ml/min,此时土壤含水率基本达到饱和,降雨全部转成径流,因此径流量趋于恒定值^[11]。

泥沙的变化规律与径流有所不同。产流后18 min内泥沙流失量呈线性分布,具体表现为迅速增加。其原因为降雨前期由于雨滴的击溅作用使得土壤颗粒松散、迁移、淋失,随着雨滴对坡面的连续冲击,土壤抗蚀性减弱,坡面颗粒开始松散,泥沙流失量增大^[12]。产流后14 min内流失规律与径流基本相同,相关系数达到0.936。这与王文龙^[13]得出的结论保持一致,即流量与侵蚀产沙和侵蚀形态发育成正相关关系,流量越大产沙量也越大。而从18 min开始一直到产流结束表现为波动减小,这是由于该时段的土壤具有较高含水率,此时的土壤入渗相对较少,所以坡面侵蚀过程也变化不大。但是由于坡面经过较长时间降雨侵蚀导致其表面产生了细沟,而这些细沟又发生塌陷等情况,导致该时段内有不规则泥沙骤增现象^[14-15]。

2.2 坡面磷素流失浓度和流失比率分析

在降雨过程中,不同背景值坡面径流和泥沙中磷素平均含量均值和标准差见表3。径流和泥沙中磷素均值与坡面背景值大小呈正相关,相关系数分别达到0.98,0.99。径流和泥沙中磷素浓度标准差随着坡面背景值的增加而增大,说明背景值越大磷素流失越不稳定。

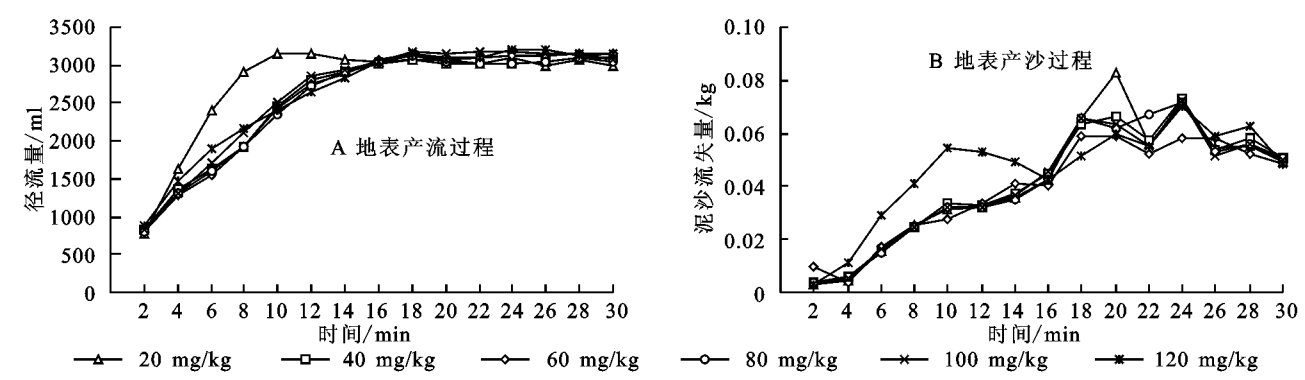
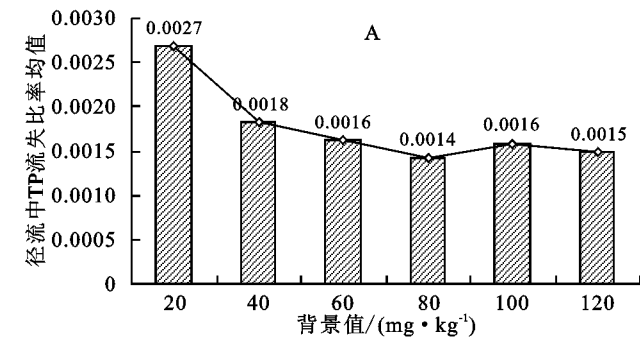


图 1 地表产流产沙过程

表 2 产流产沙过程回归分析						
产流时间	径流			泥沙		
	R^2	K_1	b_1	R^2	K_1	b_1
0~14 min	0.969	177.28	651.06	0.936	3.232	-2.038
14~18 min	0.987	49.1672246.3		0.875	11.175	25.6
18~30 min	0.002	-0.3813099.7		0.413	-2	67.321

表 3 径流和泥沙中磷的浓度均值与标准差				
背景值	径流		泥沙	
	均值	标准差	均值	标准差
20	0.054	0.002	9.389	1.081
40	0.073	0.005	15.321	1.444
60	0.098	0.004	25.296	1.190
80	0.113	0.005	35.967	1.741
100	0.158	0.004	46.929	2.870
120	0.178	0.008	59.266	1.437
R^2	0.98	0.53	0.99	0.29

径流和泥沙中磷素流失比率均值见图 2。流失比率表示在降雨条件下土壤对磷素的吸附情况。单个磷背景值坡面径流和泥沙中磷素流失比率在整个降雨过程中无显著变化,而不同磷背景值坡面流失比



2.3 坡面磷素流失量分析

降雨过程中磷素流失量见图 3,结果分析见表 4。产流后 14 min 内径流中磷素流失量呈迅速增加趋势,各小区径流中 TP 含量呈现较好的线性分布,其相关系数 R^2 , k_1 , b_1 均随背景值的增加而增大。原因

率均值却有较明显的区别。径流中磷素流失比率均值最大的是 APb₂₀ 坡面,最小的是 APb₈₀ 坡面,其他坡面流失比率均值相差较小。原因为,随着土壤中磷素浓度增加,土壤对磷的吸附率增加^[16]。张海涛等^[17]通过盆栽试验,研究磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附和解吸特性的影响,得出施用有机肥可使低磷和较高磷土壤易解吸磷量显著增加,而极高磷土壤易解吸磷量则明显降低,说明低磷和较高磷土壤对磷的吸附量低,高磷土壤吸附量高。泥沙中磷素流失比率均值变化则与径流不同,APb₄₀ 坡面其流失比率最小,其他坡面均值相差较小。原因是尽管坡面背景值增大有利于磷素的吸附,但是土壤吸附能力有限,因此当背景值过大而超出土壤对磷素的吸附能力时,就会产生磷素流失现象。对比径流、泥沙流失比率最小的 2 个坡面,APb₄₀ 的坡面径流中总磷的流失比率均值是 APb₈₀ 坡面的 1.29 倍,而 APb₈₀ 的坡面泥沙中速效磷流失比率均值是 APb₄₀ 坡面的 1.2 倍,由此可以看出二者对于磷素的吸附情况相差不大。从节约资源和后期植物利用角度来说,APb₄₀ 坡面有效磷含量和利用率更高。

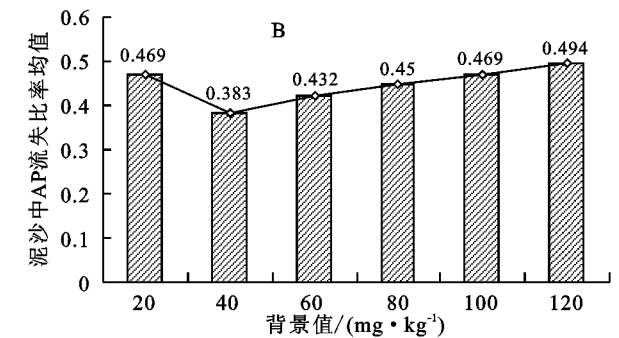


图 2 径流泥沙中磷素流失比率均值

为降雨初期随着水分与土壤接触时间的增长,有更多的磷素被解吸,所以径流中的磷素流失量逐渐增加^[18]。14 min~18 min 内径流中磷素流失量呈缓慢增加趋势,其相关系数 R^2 , k_2 , b_2 变化趋势与前 14 min 基本相同,但相同背景值坡面的 k_2 均小于 k_1 , b_2

均大于 b_1 。18 min 之后,各小区径流中 TP 流失量变化较小,逐渐趋于平稳,因此各个坡面 k_3 基本相同,而 b_3 变化情况与 b_1, b_2 相同,但其相同背景值坡面比 b_1, b_2 都大。而其流失量均值具体表现为: APb₂₀ 坡面最小,为 0.148 mg; APb₁₂₀ 坡面最大,为 0.467 mg。APb₁₂₀ 坡面标准差为 0.128,这与流失量标准差最小的 APb₂₀ 坡面相比,增加 3 倍之多。可见,土壤背景值越高,随着径流所流失的磷素也就越多。

泥沙中磷素的流失在产流后 18 min 内与径流相同,而 18 min 之后其磷素流失量表现为波动减小,其 $|k_3|, b_3$ 的大小也随着坡面背景值的增大而增大。因为随着雨水对坡面泥沙作用时间增长使得泥沙对磷的吸附能力小于解吸能力^[19-20],因此,泥沙中 AP 含

量逐渐减小。但是从流失量均值角度来说其变化趋势与径流相同: APb₂₀ 坡面最小,为 0.379 mg; APb₁₂₀ 坡面最大,为 2.722 mg; APb₁₂₀ 坡面磷素流失标准差为 1.108,这与流失量标准差最小的 APb₂₀ 坡面相比,增加 4 倍之多。由此可见,土壤背景值越高,土壤对磷的吸附率也越大,但相应的解吸率也逐渐增大^[21]。因此,随着土壤速效磷背景值的增大,通过产流流失的泥沙中 AP 的量也随之增大。

由上述分析可知,产流过程中径流和泥沙均会造成磷素的流失。但是从流失量的角度来看,径流中磷素的流失量小,最大仅有 0.6 mg;泥沙中磷素的流失量相对径流来说则较大,最大达到 4.3 mg,是径流中的 7 倍以上。由此可见,磷素主要是随着泥沙而发生坡面迁移。

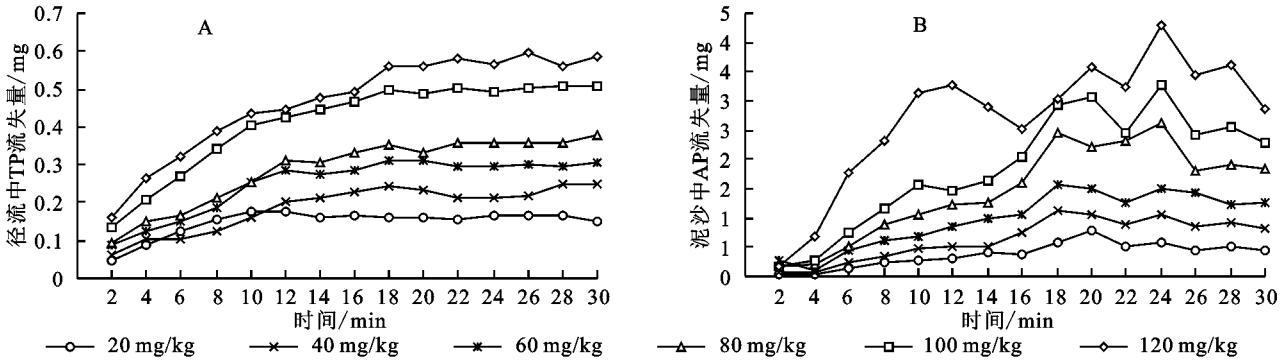


图 3 径流和泥沙中磷的流失过程

表 4 径流泥沙磷的流失量分析

背景值/ (mg · kg ⁻¹)	0~14 min				14~18 min			18~30 min			0~30 min	
	R ²	K ₁	b ₁		R ²	K ₁	b ₁	R ²	K ₁	b ₁	均值	标准差
径流磷	20	0.800	0.010	0.049	0.014	0.000	0.166	0.005	0.000	0.163	0.148	0.035
	40	0.962	0.013	0.038	0.996	0.007	0.109	0.068	0.000	0.206	0.188	0.059
	60	0.972	0.019	0.062	1.000	0.011	0.154	0.286	-0.001	0.319	0.251	0.073
	80	0.956	0.018	0.052	0.937	0.008	0.163	0.499	0.002	0.302	0.288	0.088
	100	0.963	0.027	0.103	0.988	0.012	0.273	0.477	0.001	0.473	0.414	0.116
	120	0.936	0.025	0.153	0.883	0.021	0.175	0.198	0.002	0.054	0.467	0.128
泥沙磷	20	0.972	0.032	-0.048	0.643	0.047	-0.285	0.537	-0.020	1.022	0.379	0.210
	40	0.938	0.045	-0.040	0.984	0.147	-1.551	0.645	-0.022	1.487	0.645	0.355
	60	0.958	0.105	-0.076	0.944	0.298	-2.982	0.565	-0.024	1.971	0.983	0.472
	80	0.907	0.070	0.007	0.852	0.147	-1.145	0.052	-0.053	3.442	1.472	0.794
	100	0.919	0.135	-0.079	0.957	0.321	-2.937	0.036	-0.053	3.982	1.871	0.979
	120	0.867	0.264	-0.073	0.066	0.035	2.270	0.003	-0.006	3.586	2.722	1.108

注:其中 k 为单位径流或泥沙中磷素的量, b 为该时间段起始时径流/泥沙中磷素的量。

对径流中总磷和泥沙中速效磷流失均值进行回归分析得出:径流中磷素流失与泥沙中磷素流失之间有着密切的关系,对其进行拟合,得出线性方程为 $y = 6.751x - 0.628$ (式中: y 表示泥沙中速效磷流失均值, x 表示径流中总磷流失均值)。该方程具有较好的拟合性, R^2 为 0.958,即随着径流中磷素流失的增

加,泥沙中磷素流失也随之增加,这与范昊明研究^[22]所得的结论保持一致。

3 结论

(1) 坡面径流在产流后 14 min 内迅速增大,14~18 min 内径流量缓慢增加,从 18 min 开始一直到产流结

束基本保持在 3 100 ml/min。泥沙在产流后 18 min 内迅速增加,从 18 min 开始一直到产流结束表现为波动减小。

(2) 径流和泥沙中磷素均值与坡面背景值呈大小正相关,背景值越大磷素流失越不稳定。径流中磷素流失比率均值在 APb₂₀ 坡面最大,且随着背景值的增大呈减小趋势。而泥沙中磷素流失比率均值变化则与径流不同,APb₄₀ 的坡面流失比率最小,其他坡面差异较小。

(3) 产流过程中径流和泥沙均会造成磷素的流失,但是从流失量的角度来看,泥沙中磷素的流失量是径流中的 7 倍以上,由此可见,磷素主要是随着泥沙而发生坡面迁移。对径流和泥沙中磷素流失均值进行拟合,得出方程 $y=6.751x-0.628$,且该方程具有较好的拟合性,相关系数为 0.958,进而可知泥沙中磷素的流失与径流中的磷素流失有着密切的关系。

参考文献:

- [1] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 35(3): 471-477.
- [2] 范昊明,黄东浩,周丽丽,等. 季节性冻融作用对黑土坡面磷素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 152-155.
- [3] Kweon G, Lund E D, maxton C. et al. Comparison of Soil Phosphorus Measurements[J]. Transactions of the Asabe, 2015, 58(2): 405-414.
- [4] 戴照福,王继增,程炯. 土壤磷素非点源污染及其对环境影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(Z1): 323-327.
- [5] 周旺明,王金达,刘景双,等. 冻融及枯落物对湿地土壤淋溶液的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 927-932.
- [6] 郭成久,刘金壮,孙景刚,等. 不同初始含水量对草甸土坡面养分迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 41-45.
- [7] 张峰,王秀珍,黄敬峰,等. 基于 GIS 的浙江省旱涝灾害时空分析[J]. 科技通报, 2009, 25(6): 747-752.
- [8] 张录军,钱甬甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.
- [9] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 64-67.
- [10] 付宏渊,曾铃,王桂尧,等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359-2365.
- [11] 陈伟,莫海鸿,陈乐求. 非饱和土边坡降雨入渗过程及最大入渗深度研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(6): 13-16.
- [12] 付兴涛. 坡面径流侵蚀产沙及动力学过程的坡长效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [13] 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 40-43.
- [14] 尚佰晓. 天然降雨条件下棕壤土坡面侵蚀产沙时空演变过程研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [15] 葛金金,杨加智,詹美礼,等. 坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J]. 水电能源科学, 2015(2): 101-104.
- [16] Aronsson K A, Ekelund N G A. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(5): 155-1605.
- [17] 张海涛,刘建玲,廖文华,等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 284-290.
- [18] 化全县,周健民,王火焰,等. 水溶性有机高分子对红壤磷吸附特征的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 5-8.
- [19] 赵庆雷,吴修,袁守江,等. 长期不同施肥模式下稻田土壤磷吸附与解吸的动态研究[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 113-122.
- [20] 付海曼,贾黎明. 土壤对氮、磷吸附/解吸附特性研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 198-203.
- [21] Aronsson K A, Ekelund N G. Biological effects of wood ash application to forest and aquatic ecosystems [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(5): 1595-605.
- [22] 范昊明,黄东浩,周丽丽,等. 季节性冻融作用对黑土坡面磷素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 152-155.