

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.03.022

人工土壤中氮磷氯元素降雨侵蚀试验研究^①

宋媛媛¹, 邱利平¹, 赵本淑¹,
龙 凤¹, 李绍才¹, 孙海龙²

1. 四川大学 生命科学学院, 成都 610000; 2. 四川大学 水利水电国家重点实验室, 成都 610000

摘要: 利用人工降雨模拟试验, 研究了降雨场次、初始养分量和坡度对人工土壤 N,P,Cl 3 种营养元素径流损失特性的影响. 结果表明: (1) 径流水中 N,P,Cl 元素养分质量浓度与降雨场次之间呈对数关系、与初始养分量和坡度之间呈线性关系; (2) N,P,Cl 元素养分流失量与降雨场次呈对数关系、与初始养分量和坡度之间呈线性关系; (3) 降雨场次对氮元素的作用明显高于磷和氯元素, 坡度对 N,P,Cl 元素的作用大小依次为: Cl,P,N.

关键词: 人工土壤; 氮; 磷; 氯; 径流损失; 降雨场次; 坡度

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2015)03-0132-07

近年来, 随着各类基本建设工程的加大, 岩土开挖创面大量产生, 据保守计算, 仅道路建设形成的岩土创面就达到年 1 亿 m² 以上. 由于缺少必需的土壤条件, 人工土壤是进行岩土创面植被恢复与绿化的主要功能构件, 用于提供植被生长所需的合理物理结构及物质基础^[1]. 人工土壤需添加大量的营养元素, 以保障其物质保障功能, 在降雨条件下的物质稳定对整个工程的效应实现具有重要意义. 如果大量流失, 不仅对环境带来巨大影响, 也将产生严重浪费^[2-3], 对其深入研究不仅能阐明其养分流失机制, 而且对指导工程实践、调节和改善各种限制因素都具有重要意义. 目前, 国内外相关研究主要集中在人工土壤配方及应用方法、人工土壤抗侵蚀性能等方面^[4-8], 还鲜见有关养分降雨径流损失问题的研究.

国内外有很多关于植物必需营养元素径流损失的研究, 但很多都是关于侵蚀产沙带走的养分损失研究^[9-16], 虽然泥沙养分质量浓度高于径流水相中的养分质量浓度, 但是径流水相中的养分是以速效养分为主, 人工土壤中的速效养分在植物初期建立时作用尤为重要, 其损失对植物营养吸收有着直接的影响^[17-18], 不容忽视. 氮、磷、氯是植物生长所必需的非金属元素, 其在人工土壤中的形态与过程与金属元素有差异性^[19]. 为此, 本研究采用人工降雨试验, 研究了不同降雨场次、初始养分量和坡度情况下, 氮、磷和氯元素随着径流水相损失的情况, 目的是将这些关系定量地加以反映和描述, 为人工土壤的设计及效应评价提供支持.

1 试验材料与试验方法

1.1 人工降雨设备

本试验所用人工模拟降雨设备由中国科学院水利部水土保持研究所设计定制的, 模拟降雨的最大有效

① 收稿日期: 2013-11-14

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011NAK12B04, 012BAD11B03).

作者简介: 宋媛媛(1990-), 女, 宁夏固原人, 硕士研究生, 主要从事人工土壤养分研究.

通信作者: 孙海龙, 助理研究员.

面积为 $410\text{ m}\times 410\text{ m}$, 降雨高度为 5 m , 降雨量可调节范围为 $30\sim 300\text{ mm/h}$, 降雨均匀度系数为 $90\%\sim 97\%$. 试验所用土槽规格为: 长 $\times$ 宽 $=140\text{ cm}\times 70\text{ cm}$, 坡度可在 $28^{\circ}\sim 63^{\circ}$ 之间分级调节.

1.2 试验材料

试验中人工土壤厚度 5 cm , 容质量 1.2 g/cm^3 . 主要由紫色岩泥土、泥炭、高分子材料、肥料等混合而成, 人工土壤配制以及配方比例等涉及知识产权保密. 其中, 泥炭和紫色土的主要基本理化性质见表 1.

表 1 人工土壤原料的主要基本理化性质

原料名称	容质量 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	pH	阳离子交换量 /($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 N /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 K /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 Cl /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
紫色岩土	1.22	7.40	15.12	9.67	0	11.49	14.02
草炭	0.47	5.47	/	361.15	881.92	156.98	3.84

1.3 试验设计

本试验总共进行了 3 组不同的试验: (1) 以初始养分量为梯度, 试验中初始养分梯度通过加过磷酸钙(五氧化二磷含量: 11.30%)、尿素(全氮含量: 40.31%)和氯化钾(氧化钾含量: 49.18%)来改变, 设计了 4 个养分梯度见表 2, 根据岩土护坡坡面以及降雨设备将坡度设置为 63° ; (2) 以坡度为自变量, 根据降雨设备坡度可调节范围, 设置 D1: 28° 、D2: 45° 、D3: 50° 、D4: 63° 4 个坡度梯度, 选取养分梯度为 T1; (3) 研究不同降雨场次下养分径流损失的变化: 养分径流损失的变化, 选取坡度 45° , 养分梯度 T1, 降雨 6 次.

表 2 初始养分量

元素	T1/g	T2/g	T3/g	T4/g
氮	7.85	10.36	12.88	15.40
磷	5.38	7.51	9.65	11.78
氯	2.43	2.81	3.19	3.57

为达到降雨过程中充分径流, 降雨强度设置为 33.4 mm/h , 降雨时间 1 h . 不同降雨场次试验, 间隔 1 h 降雨. 降雨前将试件浇至水分饱和, 使其初始含水量统一. 试验流程图见图 1.

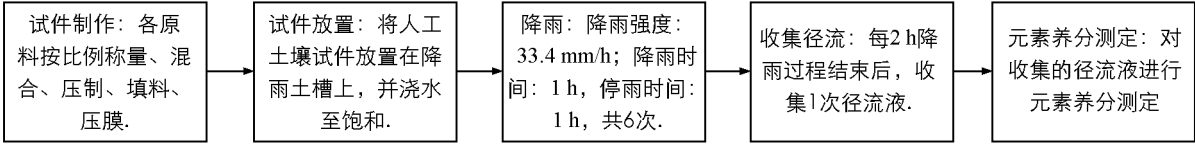


图 1 试验流程图

1.4 试验方法

每次降完雨之后测定径流量并取样分析养分含量. 径流量使用电子称称质量, 称完后摇匀, 用 1 L 聚乙烯塑料瓶取待测样, 加入 2 mL 浓 H_2SO_4 使样品 $\text{pH}<2.0$, 立即放入冰箱冷藏, 待测. N 测定使用半微量凯氏法(LY/T 1228-1999); P 测定使用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89); Cl 测定参考土壤中氯离子测定使用硝酸银滴定(NYT 1378-2007).

1.5 数据处理

用 Microsoft Office Excel(2010) 处理数据并绘图; 使用 SPSS19.0 分析数据.

2 结果与分析

2.1 降雨场次与径流液养分质量浓度和养分流失量的关系

坡度和初始养分质量浓度一定的情况下, 降雨场次与径流液养分质量浓度和养分侵蚀总量的关系见图 2. 由图 2A 可以看出, 降雨强度不变时, 随着降雨场次的增加, 径流液中 N,P,Cl 元素的养分质量浓度先不断减少. 图 2B 可以看出, N,P,Cl 元素的养分流失量也随着降雨场次的增加呈现减少的趋势. 说

明降雨场次与径流液中元素养分质量浓度和养分流失量存在明显的负向关系。

降雨场次与径流液中元素养分质量浓度和养分流失量间分别有较好的对数关系：

$$C=a\ln(n)+b \tag{1}$$

$$S=a\ln(n)+b \tag{2}$$

式中： C 为径流液中元素的养分质量浓度； S 为元素养分流失量； n 为降雨场次； a, b 为拟合参数。拟合结果及相关系数见表 3，相关系数均较高。

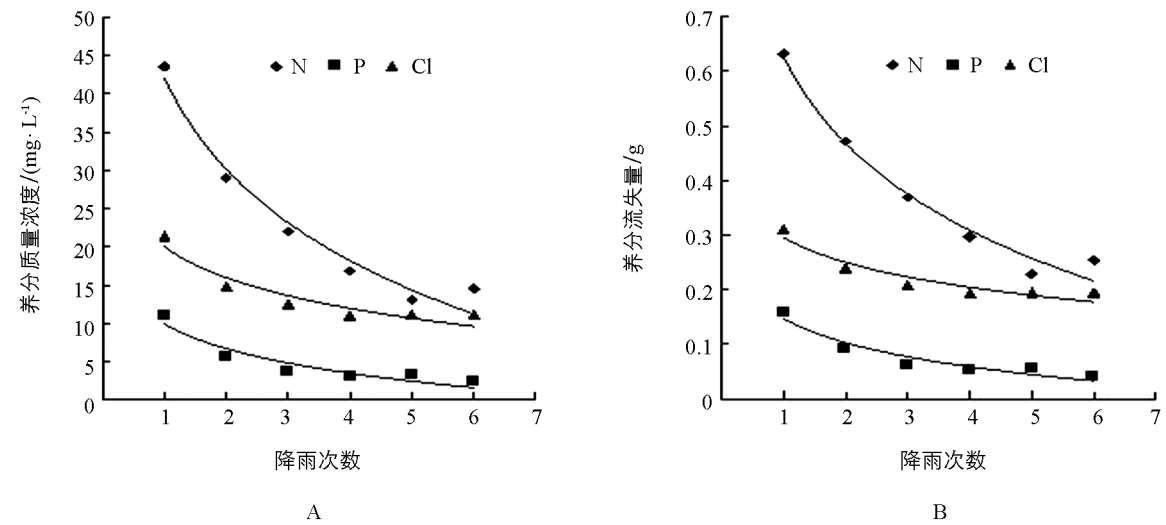


图 2 降雨次数与养分质量浓度和养分流失量间的关系

表 3 分析可知，越大，说明径流液中元素的养分质量浓度和养分流失量随着降雨场次的增加减少幅度越明显。表 2 中可以看出，N 元素的明显大于 P 和 Cl 元素的，而 P 元素的值小于 Cl 元素的，说明降雨过程 3 种元素对径流冲刷侵蚀的响应敏感程度不一样，大小依次为 N,Cl,P。

表 3 降雨场次与径流液养分质量浓度和流失量的拟合参数及相关系数

元 素	养分质量浓度			养分流失量		
	a	b	R^2	a	b	R^2
氮 N	-17.19	42.02	0.97	-0.23	0.63	0.98
磷 P	-4.64	9.93	0.91	-0.06	0.15	0.94
氯 Cl	-5.78	19.99	0.90	-0.07	0.30	0.90

2.2 坡度与养分流失量的关系

当元素初始养分质量浓度一定时，坡度与产流总量和养分流失量的关系如图 3~4。图 3 可以明显看出，产流总量随着坡度增加而呈直线下降，其回归拟合方程为

$$y=-1.232\ 6x+160.72 \qquad R^2=0.95$$

拟合度较高。由于产流总量随着坡度由缓变陡明显减少，则 N,P,Cl 元素的养分流失量随坡度增加呈减少趋势(图 4)。说明坡度与元素的养分流失量呈负向关系。

坡度与养分流失量间存在明显的线性关系：

$$S=a\theta+b \tag{3}$$

式中： S 为元素养分流失量； θ 为坡度； a, b 为拟合参数。拟合结果及相关系数见表 4，相关系数均较高。

表 4 分析可以看出， R^2 值越大，说明元素养分侵蚀率随着坡度变化越明显。表 4 中，Cl 元素的最大，其次是 P 元素，Cl 元素的最小，说明随着坡度变化，养分侵蚀率大小依次为 Cl 元素的，P 元素的，N 元素的。

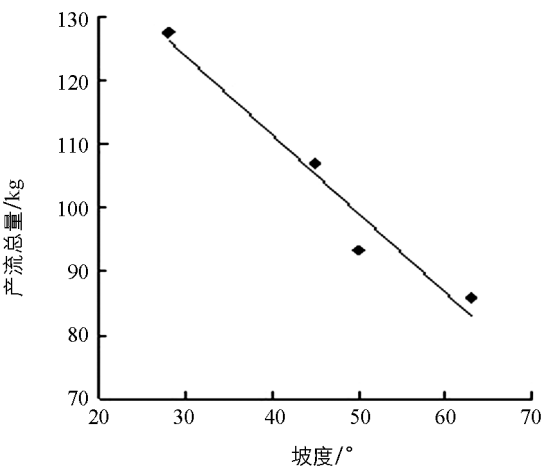


图 3 坡度与产流总量间的关系

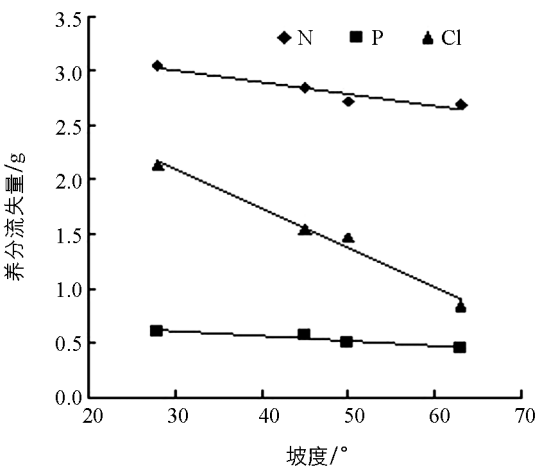


图 4 坡度与养分流失量间的关系

表 4 坡度与养分流失量的拟合参数及相关系数

元素	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
氮 N	−0.01	3.33	0.91
磷 P	−0.004 5	0.74	0.91
氯 Cl	−0.036	3.18	0.98

2.3 养分初始含量与径流液养分质量浓度及流失量关系

坡面坡度一定时,养分初始含量与径流液中元素养分质量浓度及流失量的关系如图 5~6. 图 5 可以看出,径流液中 N,P,Cl 元素的养分质量浓度都随着元素初始养分量增加而增加. 随着 N,P,Cl 元素的初始养分量增加,径流液中它们的养分质量浓度随着增加,从而导致养分流失量也呈增加的趋势(图 6). 说明元素初始养分量与径流液中元素的养分质量浓度和养分流失量存在正向相关.

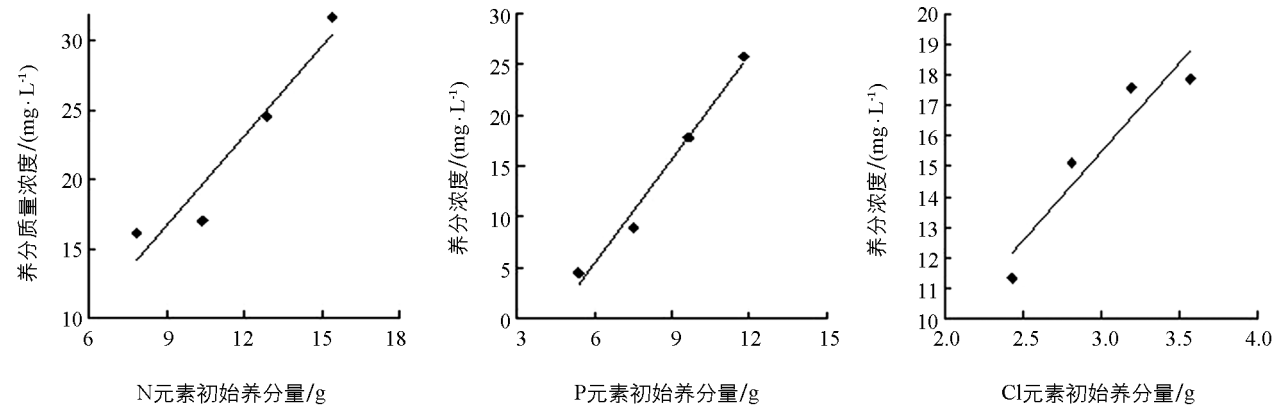


图 5 元素初始养分量与径流液养分质量浓度间的关系

元素初始养分量与径流液中元素的养分质量浓度和养分流失量分别呈显著的线性关系:

$$C=aT+b \tag{4}$$

$$S=aT+b \tag{5}$$

式中: *C* 为径流液中元素的养分质量浓度; *S* 为元素养分流失量; *T* 为元素初始养分量; *a*, *b* 为拟合参数. 拟合结果及相关系数见表 5, 相关系数均较高.

表 5 元素初始养分量与径流液养分质量浓度和养分流失量的拟合参数及相关系数

元 素	养分质量浓度			养分流失量		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
氮 N	2.16	−2.73	0.92	0.16	0.20	0.91
磷 P	3.40	−14.90	0.98	0.26	−1.06	0.94
氯 Cl	5.80	−1.92	0.89	0.59	−0.49	0.88

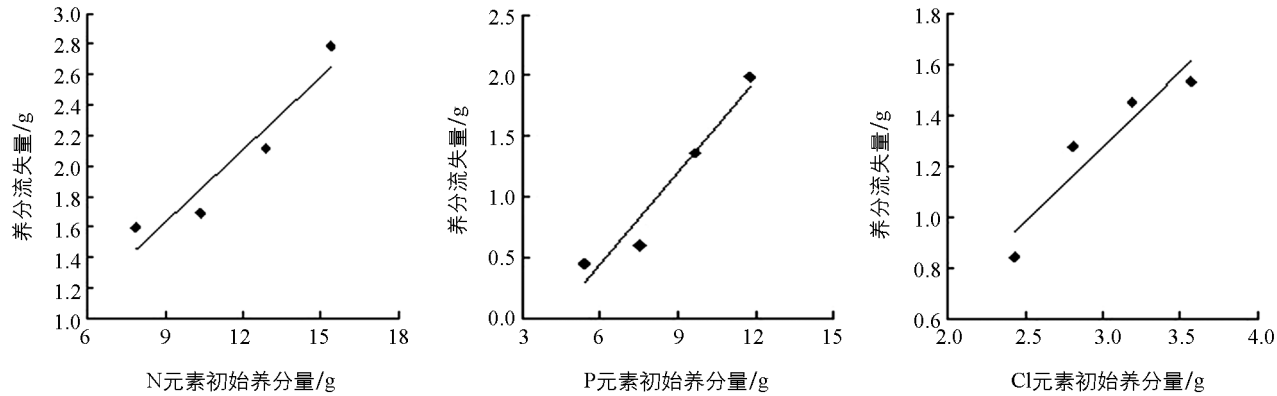


图 6 元素初始养分量与养分流失量间的关系

3 结论与讨论

降雨发生后,当雨滴动能大于土壤入渗力时,径流便会产生.由于试验中人工土壤试验结构的特殊性,径流流失过程中养分流失主要途径为随地表径流水的损失,而随着泥沙流失的养分量很少,可忽略不计.因此,降雨过程中在雨滴击打作用下,随地表径流冲刷作用而流失的养分主要以活性有效养分为主,即可溶性养分占多数.

土壤中可溶性养分随径流流失主要集中在产流前期,而后期则均匀稳定^[20].图 2 可以看出,径流液中 N,P,Cl 元素的养分质量浓度和流失量在降雨前期损失量明显高于降雨后期,并且在降雨后期趋于稳定.通过回归分析,发现降雨场次与径流水相中元素的质量浓度和径流量呈显著的对数函数关系.这是因为在降雨前期,表层土壤中水易溶态养分含量较高,经地表径流水相携带的活性有效养分含量较高,从而导致径流中的 N,P 和 Cl 元素的养分质量浓度和流失量较高^[21].随着降雨的进行,表层土壤中携带的水易溶态养分基本流失掉了,深层土壤表面水易溶态养分含量降低,并且溶解度一定即含量变化不大,所以径流中的 N,P 和 Cl 元素养分质量浓度和流失量降低,并且趋于稳定.

土壤中的养分流失一般有两个主要途径,一是随地表径流水相和沉积物相的横向迁移;二是随水分下渗形成的纵向迁移,即养分的淋失^[22].而土壤中的活性有效养分主要是随着地表径流水相的横向迁移,坡度是影响地表径流量的重要因子之一.一般当坡度在 0~30°时,坡度和径流量呈正相关关系,但当坡度大于 30°时,径流量会随着坡度变陡而减小.由于当坡面面积一定时,随着坡度由缓变陡,坡面水平面积减小,亦在单位时间内降雨量减少^[23],这与杨春霞等的结果一致^[24].而本研究中明显地看到,在其它各条件一定时,地表径流量和坡度呈显著的负线性相关关系($R^2=0.954\ 5$).坡度是通过影响径流量来间接地影响元素养分流失量^[25].坡度由缓变陡,产流量随之减少,随着水流冲刷的养分含量也在减少,并且也跟坡度呈显著的负线性相关关系.

在降雨强度不变的情况下,径流量和径流水中径流液养分质量浓度是养分径流损失量的两个重要构成因素^[26].初始养分梯度主要改变径流水中营养元素的浓度,进而影响养分径流损失量;初始养分梯度越大,水溶性养分含量越多,流失的养分质量浓度越大,养分径流损失量也呈增加趋势.

本试验初步研究了地表径流水相中 N,P,Cl 3 种营养元素在不同初始养分梯度、不同降雨场次及不同坡度下径流损失规律,获得了一定的结果.但人工土壤的径流损失的影响因素较多,配方、材料特性等均影响结果,还需要更多的试验去探明.

参考文献:

- [1] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.岩石边坡喷播植草护坡工程的抗侵蚀效应[J].北京林业大学学报,2006,28(1): 43—47.
- [2] NOVOTNY V, OLEM H. Water Quality: Prevention, Identification and Management of Diffuse Pollution [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.
- [3] 王莹,梁勤爽,杨志敏等.淋溶对畜禽粪便释放氮磷面源污染物的影响[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(1): 92—98.
- [4] 张鸿龄,孙丽娜,孙铁珩.陡坡无土排岩场植被生态修复技术[J].生态学杂志,2010,29(1): 152—156.
- [5] 董建志,张科利,王颖,等.黄土高原公路弃土场侵蚀规律及其模拟研究[J].水土保持学报,2011,25(2): 67—71.
- [6] 贺祥,熊康宁,陈洪云.喀斯特石漠化地区不同治理措施下的土壤抗蚀性研究(以贵州毕节石桥小流域为例)[J].西南师范大学学报:自然科学版,2009,34(4): 133—139.
- [7] FOHRER N, BERKENHAGEN J, HECKER J M, et al. Changing Soil and Surface Conditions During Rainfall: Single Rainstorm/Subsequent Rainstorms [J]. Catena, 1999, 37: 355—375.
- [8] HIGNETT C T, GUSLI S, CASS A, et al. An Automated Laboratory Rainfall Simulation System with Controlled Rainfall Intensity, Raindrop Energy and Soil Drainage [J]. Soil Technology, 1995, 8: 31—42.
- [9] 李渊,陈晓燕.基于长期定位的紫色土侵蚀—降雨—植被的关系研究[J].西南大学学报:自然科学版,2008,30(5): 135—139.
- [10] 王库,史学正,于东升.红壤丘陵区不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征[J].西南农业大学学报:自然科学版,2006,28(5): 697—701.
- [11] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2012,28(16): 121—126.
- [12] 何丙辉,郭甜,姚军,等.紫色土坡耕地不同施肥水平下泥沙中氮、磷流失特征[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(7): 1—8.
- [13] HESSEL R, VAN ASCH T. Modeling Gully Erosion for a Small Catchment on the Chinese Loess Plateau [J]. Catena, 2003, 54: 131—146.
- [14] TORRI D, BORSELLI L. Equation for High-Rate Gully Erosion. Catena, 2003, 50: 449—467.
- [15] 张怡,何丙辉,唐春霞.“大横坡+小顺坡”耕作模式对氮及径流流失的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2013,30(3): 107—112.
- [16] 江东,卢喜平,蒋光毅,等.降雨因素对紫色土坡地土壤侵蚀影响的试验研究[J].西南大学学报:自然科学版,2009,31(1): 140—144.
- [17] 张学权,胡庭兴,李伟,等.林竹草植被恢复初期地表径流及其养分流失特征[J].中国水土保持,2005,10: 25—27.
- [18] 张宏,张伟,徐洪灵.川西北高寒草甸生长季土壤氮素动态[J].四川师范大学学报:自然科学版,2011,34(4): 583—588.
- [19] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 刘洋,张展羽,张国华,等.天然降雨条件下不同水土保持措施红壤坡地养分流失特征[J].中国水土保持,2007,12: 14—16.
- [21] 姚军,王亮,何丙辉.人工模拟降雨不同施肥方式下紫色土养分流失研究[J].西南大学学报:自然科学版,2010,32(11): 83—88.
- [22] 林超文,庞良玉,罗春燕,等.平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响[J].生态学,2009,29(10): 5552—5560.
- [23] 肖建芳,张洪江,江玉林,等.沪蓉西高速公路弃土场渣体侵蚀特征[J].水土保持研究,2007,14(3): 121—123.

- [24] 杨春霞, 吴卿, 杨剑锋, 等. 人工模拟坡面产流试验研究 [J]. 中国水土保持, 2006, 6: 24—25.
- [25] 王 亮, 何丙辉. 人工模拟降雨条件下紫色土养分流失规律分析 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 145—149.
- [26] 郭 智, 肖 敏, 陈留根, 等. 稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1622—1627.

Experimental Study on Rainfall Erosion of Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Chlorine (Cl) in Artificial Soil

SONG Yuan-yuan¹, QIU Li-ping¹, ZHAO Ben-shu¹,
LONG Feng¹, LI Shao-cai¹, SUN Hai-long²

1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610000, China;

2. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610000, China

Abstract: In an artificial rainfall simulation experiment, the effects of rain date, initial nutrient content and slope in plot on the runoff loss characteristics of N, P and Cl were studied. The results showed that the concentrations of N, P and Cl nutrients in the runoff water were in a logarithmic relationship with rainfall date and in a linear relationship with initial nutrient content and slope; that the loss quantity of N, P and Cl nutrients was in a logarithmic relationship with rainfall date and in a linear relationship with initial nutrient content and slope; and rainfall date had a significantly greater effect on N than on P and Cl, and the effect of slope on the nutrients appeared in the sequence of Cl, P and N.

Key words: artificial soil; nitrogen; phosphorus; chlorine; runoff loss; rainfall date; slope

责任编辑 陈绍兰

