

# 模拟降雨条件下不同植被覆盖度/格局的坡地 土壤铵态氮流失特征

刘 泉<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>2,3</sup>, 李 鹏<sup>3</sup>, 黄文军<sup>1</sup>

(1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000; 2. 中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西安理工大学, 西安 710048)

**摘 要:** 尽管采取各种措施控制农业氮素污染, 但大量氮素的流失仍然成为农业非点源污染的主要来源之一。采用室内模拟降雨的方式, 选用了 3 种植被覆盖度(25%, 50% 和 75%)、9 种不同的植被格局, 对 21° 坡面铵态氮随径流和泥沙流失迁移规律进行了研究。结果表明: 径流和泥沙流失的控制关键期在初期产流阶段。植被覆盖度 25% 时, 铵态氮流失规律不明显。植被覆盖度 50% 时, 在中期和后期产流阶段径流和泥沙携带的铵态氮流失量分别占累计流失量 71.2%~82.8%, 应加强中期和后期产流阶段铵态氮流失量控制。植被覆盖 75% 时, 初期产流阶段是铵态氮流失控制的关键时期。径流与径流结合态铵态氮流失量呈幂函数关系, 两者呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 泥沙与泥沙结合态铵态氮流失量均呈幂函数关系, 并具有极显著正相关性( $p < 0.01$ )。径流和泥沙流失是坡面铵态氮流失的两种途径。从削减水沙和养分流失量角度来看, 坡下植被格局最强, 坡上植被格局次之, 坡中植被格局最弱。

**关键词:** 铵态氮; 植被覆盖度/格局; 模拟降雨

中图分类号: S157.1; S153; P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0075-04

## Characteristics of Ammonium Nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) Loss from Slope Lands with Different Vegetation Cover/Patterns Under Simulated Rainfall

LIU Quan<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>2,3</sup>, LI Peng<sup>3</sup>, HUANG Wenjun<sup>1</sup>

(1. Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China; 2. Institute of Soil and Water

Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Although the government has taken various measures to control nitrogen pollution on cropland, large loss of nitrogen along with runoff and sediment is one of primary source of agricultural non-point source pollution. Three types of vegetation coverage (25%, 50% and 75%) including nine vegetation patterns were selected for examining the loss processes of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  along with runoff and sediment on the 21° slope land under indoor simulated rainfall condition. The results show that the critical period of controlling runoff and sediment losses is the early runoff stage (ERS). The pattern of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss is not obvious when vegetation coverage is 25%, the amounts of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss through runoff and sediment in the middle runoff stage and late runoff stage accounted for 71.2%~82.8% of total losses when vegetation cover is 50%. As for controlling  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss, the ERS is the best period when vegetation cover is 75%. The relationship between runoff and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss by runoff (RAN) follows the power function, and runoff is significantly positive correlated with RAN ( $p < 0.05$ ). The relationship between sediment and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss by sediment (SAN) can be described by power function, and sediment and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss are highly significant and positive correlated ( $p < 0.01$ ). With respect to three vegetation patterns, the reduction capacity on runoff, sediment and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  loss decreases in the order: lower patterns > upper patterns > middle patterns.

**Keywords:** ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ); vegetation cover/patterns; simulated rainfall

收稿日期: 2016-03-02

修回日期: 2016-03-22

**资助项目:** 国家科技支撑计划课题“农田水土保持工程与耕作关键技术研究”(2011BAD31B01); 绵阳师范学院博士科研启动项目“嘉陵江中游典型小流域水沙—养分(N,P)淋失机理研究”(QD2014A002); 绵阳师范学院青年资助项目“坡耕地水土流失过程中养分输移机理研究”(2013B09)

**第一作者:** 刘泉(1978—), 男, 江苏丰县人, 副教授, 博士生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: liuquan78@126.com

**通信作者:** 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lipeng74@126.com

随着点源污染得到逐步控制,非点源污染已经成为水体富营养化的主要原因,农田土壤氮素流失是非点源污染的重要表现形式<sup>[1]</sup>。土壤养分流失因其对土壤质量、水体环境和人类健康的危害而长期受到中外学者的共同关注<sup>[1-4]</sup>。研究表明,径流和泥沙能够携带大量土壤养分迁移<sup>[5]</sup>。因此,设置不同耕作模式和植被覆盖格局,有效控制农田氮肥的过量使用,成为降低农业非点源污染研究的严峻课题。

坡地土壤铵态氮是氮素流失的主要形态之一,造成铵态氮流失是多种因素相互作用的结果<sup>[6-8]</sup>。根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)规定,集中式生活饮用水地表水源地水体铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )含量 $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。本文在室内模拟降雨试验观测的基础上,研究单一坡度( $21^\circ$ )和不同植被格局条件下铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )流失规律及特征,探讨地表径流、泥沙流失对铵态氮流失量的影响,从而为减少坡地氮素径流流失、控制农业非点源污染提供研究思路。

## 1 试验设计与方法

模拟降雨试验在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪大厅进行。所用土壤为西安东郊黄土,根据坡地实际施肥量,将300 g硝酸铵钙(Calcium ammonium nitrate, CAN)均匀施入供试土壤中,并平铺于土槽内0—10 cm的土壤表层,土壤质量含水率约10%,土壤装槽容重在 $1.15 \text{ g/cm}^3$ ,土槽从下至上分别划分成编号为1,2,3,4共4个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的方格,以25%,50%,75%共3种植被覆盖度,把草皮植入方格中,以不同的植入位置得到不同的植被空间格局。25%植被覆盖分别为1,2,3,4四种格局,50%植被覆盖分别为1+2,2+3,3+4三种格局,75%植被覆盖为1+2+3,2+3+4两种格局,根据植被格局在坡面位置的不同,分为坡上、坡中和坡下格局(图1)。

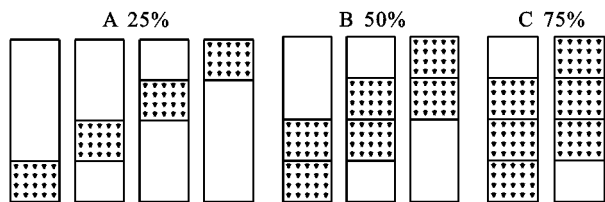


图1 25%,50%和75%植被覆盖下不同格局布局

模拟降雨系统采用针管式降雨器,喷头有效高度为13 m,试验土槽规格(长×宽×深)为 $4 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,降雨面积为 $1 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,下端设集流槽口,可定时采集径流样。雨强率定为 $2.0 \text{ mm/min}$ ,土槽坡度为 $21^\circ$ ,槽口产流同时接取水样,降雨历时60 min,以2 min为时间段用聚乙烯容器接取全部降雨时段径

流样,每场降雨产流阶段0~20,22~40,42~60 min所采集水样分别看作初期、中期和后期产流。

降雨径流结束后立即将样品送回实验室,量取径流总量,静置3 h后,取上清液500 ml,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后用于测定径流样品中铵态氮含量,经过过滤后,泥沙均匀摊开在铝盒内,风干,称重,记作泥沙流失量。土样用 $2 \text{ mol/L}$  KCl 100 ml浸提后,样品采用瑞典造FI515流动注射分析仪进行测定铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )含量。图表和数据采用统计分析软件SPSS 16.0和Excel 2010处理。单个时段径流铵态氮流失量公式:

$$m_{\text{RN}}(t) = C_{\text{N}}(t) \cdot V_{\text{R}}(t) \quad (1)$$

单个时段泥沙铵态氮流失量公式:

$$m_{\text{SN}}(t) = D_{\text{N}}(t) \cdot m_{\text{S}}(t) \quad (2)$$

式中: $m_{\text{RN}}(t)$ 为时段内水样中的铵态氮含量(mg); $C_{\text{N}}(t)$ 为时段内水样中铵态氮浓度(mg/L); $V_{\text{R}}(t)$ 为时段径流量(L); $m_{\text{SN}}(t)$ 为时段内降雨泥沙铵态氮流失量(mg); $D_{\text{N}}(t)$ 为泥沙铵态氮含量(mg/g); $m_{\text{S}}(t)$ 为时段内泥沙流失量(g)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被覆盖度/格局下径流铵态氮流失过程

由图2可以看出,不同植被覆盖度/格局下径流铵态氮流失过程差异较大。植被覆盖度25%时(图2A),植被格局1( $\text{VP}_1$ )径流铵态氮流失量自产流开始持续下降。植被格局2( $\text{VP}_2$ )在初期产流阶段径流铵态氮流失量大体趋势是缓慢增加,中期产流阶段流失量表现稳定,后期产流阶段流失量波动上升。植被格局3( $\text{VP}_3$ )在初期和中期产流阶段,径流铵态氮流失量平稳下降,后期产流阶段流失量波动上升。植被格局4( $\text{VP}_4$ )在降雨历时的前半段,径流铵态氮流失量略有下降,后半段流失量持续增加。径流铵态氮起始流失量顺序为:格局1>格局3>格局4>格局2,累积径流铵态氮流失量顺序为:格局2>格局1>格局3>格局4。植被覆盖度50%时(图2B),3种植被格局径流铵态氮的起始流失量基本相同,植被格局1+2( $\text{VP}_{1+2}$ )径流铵态氮流失量自产流开始持续增加。植被格局2+3,3+4( $\text{VP}_{2+3}$ ,  $\text{VP}_{3+4}$ ),在中期产流阶段流失量表现波动起伏较小,后期产流阶段流失量剧烈波动。累积径流铵态氮流失量顺序为:格局2+3>格局3+4>格局1+2。植被覆盖度75%时(图2C),两种植被格局径流铵态氮的起始流失量均在2 mg左右,植被格局1+2+3( $\text{VP}_{1+2+3}$ )径流铵态氮流失量在降雨阶段呈现稳定增加趋势。植被格局2+3+4( $\text{VP}_{2+3+4}$ ),径流铵态氮流失量在产流初期阶段前10分钟内,流失量持续增加,在第11~50分钟内流失量波动下降,在第

52~60 分钟内流失量陡然增加,最大流失量与最小流失量相差近 14 倍。累积径流铵态氮流失量顺序为:格局 2+3+4>格局 1+2+3。由于坡下植被覆盖度增大,植被能够有效减缓径流流速,增加下渗,携沙能力降低,铵态氮被泥沙拦截吸附,导致流失量降低。

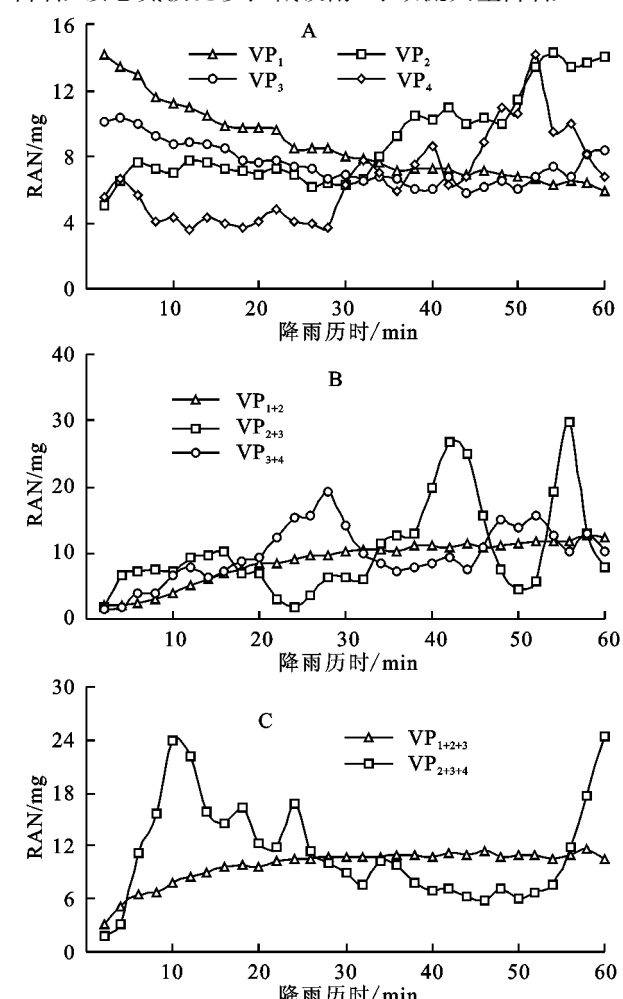


图 2 不同植被覆盖度/格局径流铵态氮流失过程

2.2 不同植被覆盖度/格局下泥沙铵态氮流失过程

从图 3 可以看出,植被覆盖度 25%时,4 种植被格局泥沙铵态氮的起始流失量相差不大(图 3A)。植被格局 1 在产流 2~16 min 内泥沙铵态氮流失量持续上升,但在 18 min 流失量突然降低,随后上升。植被格局 2 在降雨历时的前半段时间内,泥沙铵态氮流失量发展比较平稳,在后半段流失量迅速上升,在降雨结束的时刻,泥沙铵态氮流失量为起始流失量的 9 倍多。植被格局 3,4 泥沙铵态氮流失量比较平稳。累积泥沙铵态氮流失量顺序为:格局 2>格局 1>格局 3>格局 4。植被覆盖度 50%时(图 3B),整个降雨历时内,3 种植被格局的泥沙铵态氮流失过程都出现波动起伏的趋势,植被格局 2+3,3+4 在整个降雨阶段的中期和后期分别出现明显的流失峰值。21°坡面起始泥沙铵态氮流失量顺序为:格局 2+3>格局 3+

4>格局 1+2。累积泥沙铵态氮流失量顺序为:格局 3+4>格局 2+3>格局 1+2。植被覆盖度 75%时(图 3C),植被格局 1+2+3 在整个降雨阶段,泥沙铵态氮流失过程呈现波动上升的趋势,而植被格局 2+3+4 泥沙铵态氮流失过程呈现大幅度波状起伏,在第 40 min 时候出现流失峰值,为起始流失量的 7.5 倍,随后流失量下降并稳定大约 10 min 后急剧上升。泥沙铵态氮流失量顺序为:格局 2+3+4>格局 1+2+3。原因在于坡下植被覆盖度增大,径流携带泥沙能力降低,泥沙被植被根系拦截,铵态氮能够被截留在坡下,出口铵态氮流失量显著降低。

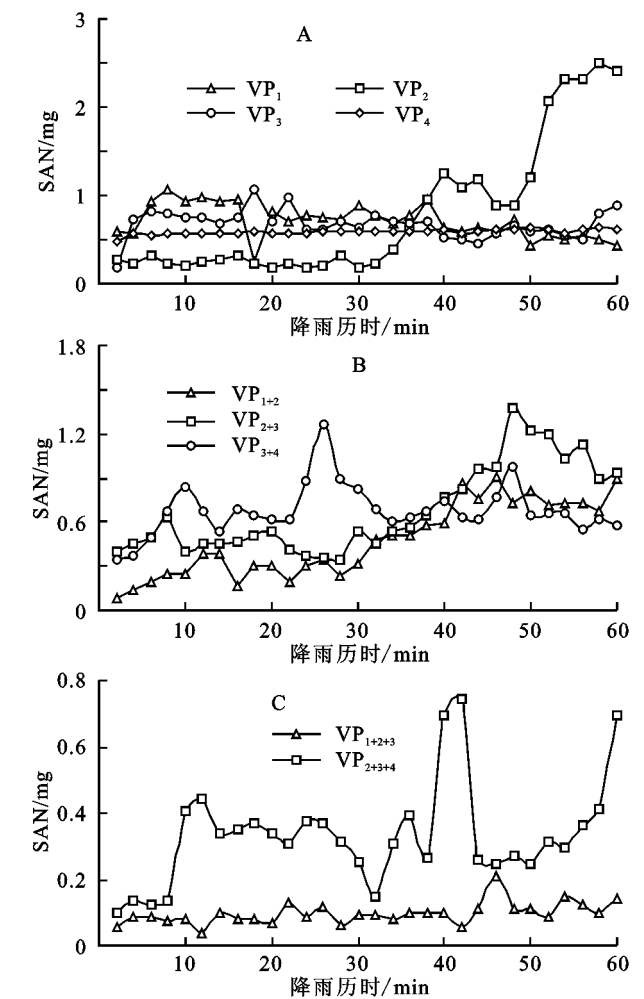


图 3 不同植被覆盖度/格局泥沙铵态氮流失过程

2.3 径流、泥沙流失量与氮素流失过程分析

养分流失量不仅取决于径流和泥沙中的养分浓度,与坡面径流和泥沙流失量也有关<sup>[9]</sup>。由表 1 可知,径流与铵态氮流失量呈幂函数关系( $p<0.05$ )。所以,径流携带是泥沙和径流铵态氮流失的主要途径,泥沙与铵态氮流失量呈幂函数关系,并具有极显著正相关性( $p<0.01$ )。铵态氮吸附在泥沙表面,并随泥沙而流失,进一步验证了径流和泥沙是坡面铵态氮流失的两种主要途径<sup>[10]</sup>。

随着覆盖面积的增加,植被格局能够削减铵态氮流失量存在差异。由表 2 可知,3 种坡面位置的植被格局消减水沙和养分的作用:坡下格局最强,坡上格局次之,坡中格局最弱。尤其是坡中格局,随着覆盖面积增加,水沙和铵态氮流失量均有不同程度增加,坡面上部消减水沙和铵态氮作用要比坡面下部相对要小,说明坡下拦蓄和合理配置覆盖度应成为布设植

表 2 3 种坡位条件下不同格局铵态氮流失消减量比较

格局	1	1+2	1+2+3	2	3	2+3	4	3+4	2+3+4
坡位	坡下			坡中			坡上		
RAN/mg	261.0	264.1	292.7	269.0	226.2	312.6	196.9	293.7	338.9
消减率/%	-1.2	-10.8		15.9	-38.2		-49.2	-15.4	
SAN/mg	21.2	14.3	2.9	23.9	20.2	20.3	17.5	20.4	10.0
消减率/%	32.5	79.7		15.5	-0.5		-16.6	51.0	

注:消减率负号代表增加了,没有削减。如铵态氮 261.0 到 264.1 消减了-1.2%,以此类推。

3 结论

(1) 植被覆盖度 25%时,需要提高植被覆盖度控制铵态氮流失量;植被覆盖度 50%时,在产流后半阶段径流和泥沙携带的铵态氮流失量占累计流失量 71.2%~82.8%,应加强中期和后期产流阶段铵态氮流失量的控制;植被覆盖 75%时,控制铵态氮流失量必须在产流初期采取治理措施。

(2) 径流与径流结合态氮素流失量呈幂函数关系,与径流硝态氮相关性不显著,与径流铵态氮呈显著正相关( $p<0.05$ )。径流与泥沙流失量呈指数函数关系,并具有极显著正相关性( $p<0.01$ )。泥沙与泥沙结合态氮素流失量均呈幂函数关系,并具有极显著正相关性( $p<0.01$ )。3 种坡面位置的植被格局,消减水沙和养分的作用坡下格局最强,坡上格局次之,坡中格局最弱。

(3) 试验在室内进行,试验条件较为理想化,考虑到土壤氮素转化的复杂条件,下一步需对其他形态氮素和土壤环境进行监测,以便全面地估算氮素流失量。

参考文献:

[1] Randall G W, Mulla D J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices[J]. Journal of Environmental Quality, 2001,30(2):337-344.

[2] Kelly B P, Pomes M L. Preferential flow and transport of nitrate and bromide in claypan soil[J]. Ground Water, 1998,36(3),484-494.

[3] Nord E A, Lanyon L E. Managing material transfer and

被格局的首选方案<sup>[11-12]</sup>。

表 1 模拟降雨条件下铵态氮与径流和泥沙关系

载体类型	样本数(n)	拟合方程	相关性 $R^2$	显著性水平 $p$
径流(R)	270	$N=2.4965R^{0.6077}$	0.1452	0.027*
泥沙(S)	270	$N=0.0176S^{1.0359}$	0.6622	0.006**

注:\*代表在  $p<0.05$  水平显著;\*\*代表在  $p<0.01$  水平显著。

nutrient flow in an agricultural watershed[J]. Journal of Environmental Quality, 2003,32(32):562-570.

[4] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall:a case study in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009,85(3):263-273.

[5] Li Z B, Li P, Han J G, et al. Sediment flow behavior in agro-watersheds of the purple soil region in China under different storm types and spatial scales[J]. Soil & Tillage Research, 2009,105(2):285-291.

[6] Udawatta R P, Motavalli P P. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with claypan soils[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 117(1):39-48.

[7] Jia H, Lei A, Lei J, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil[J]. Agricultural Water Management, 2007,89(1/2):89-97.

[8] 朱波,彭奎,谢红梅. 川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支探析[J]. 中国生态农业学报,2006,14(1): 108-111.

[9] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养和肥料学报,2003,9 (1):71-74.

[10] 何铁光,秦芳,苏天明,等. 不同栽培模式对氮磷钾养分径流流失的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(1):95-103.

[11] 褚利平,王克勤,白文忠,等. 水平阶影响坡地产流产沙及氮磷流失的试验研究[J]. 水土保持学报,2010,24 (4):1-6.

[12] 钱婧,张丽萍,王文艳,等. 施肥条件下坡面菜地径流携氮流失模拟降雨试验[J]. 水土保持学报,2015,29(5): 248-253.