

# 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响

张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 李世清

(中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 利用室内模拟降雨试验, 研究了黄土区土壤矿质氮素随地表径流迁移流失和入渗的动态变化, 初步探讨了径流与土壤矿质氮素的作用深度 ED I, 并提出了 ED I 深度的确定方法。结果表明: 土壤矿质氮素流失是降雨、径流与表层土壤矿质氮素作用的结果, 随径流流失量显著高于随泥沙流失量, 地表产流过程径流养分浓度呈现高一低一较高变化; 降雨(降雨强度)和径流是土壤溶质迁移的动力, 对土壤矿质氮素随径流流失和入渗有着重要影响。雨强增大, 土壤矿质氮素流失量、径流作用深度(ED I)和土壤硝态氮入渗锋值深度均增加; 同一坡面不同坡位土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  与径流有效作用深度(ED I)和浓度锋值深度不同, 坡中下部最深, 坡顶部和坡底部较浅; 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  入渗和再分布过程截然不同。

**关键词:** 降雨强度; 矿质氮素; 黄土坡地; 流失

中图分类号: S175.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)03-0055-04

## 0 引言

土壤氮素流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程<sup>[1]</sup>, 表现为两种形式: 其一, 在降雨条件下, 当土壤入渗能力小于雨强时, 产生地表径流, 可溶性物质随地表径流迁移; 其二, 土壤内部的可溶性物质随入渗的水分沿垂直方向迁移<sup>[2]</sup>。降雨和径流是土壤养分迁移的主要动力, 土壤是相互作用的界面和溶质迁移的“母体”。因此, 一个完整的土壤养分流失过程不仅包括降雨-入渗-产流过程, 还包括土壤侵蚀、养分动态变化过程<sup>[3]</sup>。研究表明<sup>[4,5]</sup>在一场降雨过程中, 只有土壤表层一定厚度内的养分参与径流损失, 而此厚度以下的土壤养分极少发生流失, 此厚度被称为有效混合深度(ED I)。中外学者对土壤养分的迁移和入渗机理做了大量研究, 提出了一系列数学模型<sup>[4-11]</sup>。这些模型大多为经验模型, 缺乏足够的试验实证, 未被广泛应用。

降水是土壤侵蚀和养分流失的主要驱动力, 也是土壤溶质的溶剂和载体, 对土壤养分流失具有重要的影响。本文通过人工模拟降雨条件, 研究施肥条件下, 不同降雨(主要是雨强)对黄土区土壤矿质氮素流失的影响, 旨在揭示土壤矿质氮素和降雨、径流作用机理, 为防止坡面土壤养分流失提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 供试材料

模拟降雨试验于2003年3~8月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行, 采用侧喷式自动模拟降雨系统, 喷头高度16m, 雨滴降落

终速可达到自然雨滴降落速度的98%以上。装土槽为长×宽×高=3.8m×0.3m×0.6m的坡度可调式钢槽, 下端设集流装置, 可定时采集径流样。所用土壤均为黄绵土, 采自陕西省安塞县, 质地为粉质壤土。

### 1.2 试验设计

供试土壤过5mm筛, 控制含水量在10%左右, 土壤容重维持在1.25±0.05g/cm<sup>3</sup>。试验坡度均为15°裸地。雨强设0.56、0.89、1.01和1.51mm/min四个水平, 降雨时间为90min。在降雨前3h内施入50g  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 。施肥方式: 最上面一层土层少装10kg土, 将一定量  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶于1L清水中, 用喷壶均匀喷在9kg干土上, 充分拌匀后铺在上面, 夯实并保持土面平整。降雨前测定原始土壤和雨水养分含量, 降雨结束后立即在槽内沿坡面方位5个等分点处垂直向下挖剖面, 每1cm向下取土至土层水分湿润锋处, 降雨结束24h后沿槽内6等分用土钻每5cm取土, 直至槽底。

### 1.3 样品分析

降雨过程中分不同产流时段采集径流样, 测定各泥水样的总体积, 并取部分上清液过滤后测定矿质氮含量; 剩余泥水样经澄清、倾水后将泥沙风干称重, 测定泥沙中矿质氮含量。土壤和泥沙中矿质氮用2N KCL溶液浸提(土水比为1:5)。土样和水样中的硝态氮采用紫外分光光度法测定, 铵态氮用连续流动分析仪测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 雨强对土壤侵蚀和矿质氮流失的影响

土壤氮素在侵蚀条件下随径流迁移表现为三种方式: 土壤液相中的可溶性氮素在径流中的溶解; 土壤颗粒吸附的矿质氮在径流中的解吸; 土壤颗粒中的氮素随产流在坡面传递和被水体携带。降雨动能和水流重力是这3种作用过程的动力<sup>[9]</sup>。因而, 雨强对土壤氮素流失有重要影响。在同一雨强条件下, 水土流失量与养分流失量呈显著的正相关关系; 不同雨强下, 径流累计量、流失养分累计量和泥沙累计量与雨强呈幂函数增长; 当雨强为1.56mm/min、降雨84min时, 泥沙累计量急剧增加, 而降雨过程中并未发生沟蚀; 在下垫面条

收稿日期: 2003-11-17 修订日期: 2004-03-25

基金项目: 国家自然科学基金重大科研项目(90102012); 国家自然科学基金项目(40171063, 40371076); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-106)

作者简介: 张亚丽(1976-), 女, 河南新野人, 硕士生, 主要从事土壤环境化学方面的研究工作。陕西杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100

通信作者: 张兴昌(1965-), 男, 博士生导师, 研究员, 陕西杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, Email: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

件一致时,雨强越小,产流开始时间越晚(试验所设 4 个雨强的开始产流时间分别为: 48 24、11 58、9 56 和 6 17);雨强为 1.50 mm/m in 的径流量、泥沙量、径流矿质氮流失量和泥沙矿质氮流失量分别为 0.56 mm/m in 小雨强下的 28、6.29 和 4 倍(表 1, 图 1、图 2)。由此表明

在雨前施入速效氮肥容易造成肥料氮的损失;与供试土壤相比,泥沙中硝态氮和铵态氮含量都有所增加,尤其是铵态氮浓度增加了 4~7 倍。土壤矿质氮素流失以径流流失为主,泥沙矿质氮素浓度仅占径流的 1%~6%。

表 1 雨强对降雨侵蚀量和养分流失量的影响

Table 1 Erosive amount and nutrient loss amount as affected by rainfall density

雨强 /mm · m in <sup>-1</sup>	径流量 /mL	径流矿质氮流失量			泥沙量 /g	泥沙矿质氮流失量		
		硝态氮/mg · m <sup>-1</sup>	铵态氮/mg · m <sup>-1</sup>	矿质氮/mg · m <sup>-1</sup>		硝态氮/mg · m <sup>-1</sup>	铵态氮/mg · m <sup>-1</sup>	矿质氮/mg · m <sup>-1</sup>
0.56	2373	17.22	0.62	17.84	20.91	0.69	0.43	1.12
0.89	24913	168.60	7.49	176.08	75.85	1.41	0.72	2.14
1.01	29200	204.10	15.15	219.24	74.92	1.59	1.25	2.83
1.51	66980	496.74	20.78	517.53	125.05	3.65	1.86	5.51

注:表中数据来自模拟试验所测结果。

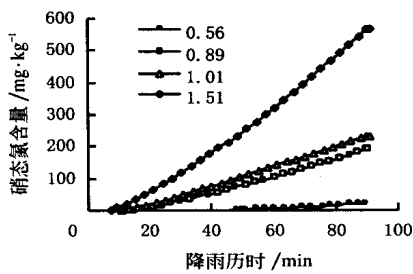


图 1 径流硝态氮累计图

Fig. 1 Nitrate loss accumulation in runoff

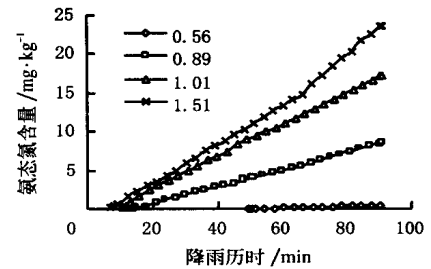


图 2 径流铵态氮累计图

Fig. 2 Ammonium loss accumulation in runoff

不同产流时段养分离失的浓度不同:产流开始时,径流中矿质氮浓度较高,后逐渐减低并趋于稳定;当降雨结束后,径流中硝态氮和铵态氮浓度均高于降雨期产流。这可能是由于初始产流时,土壤粘粒含量较高,吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中矿质氮浓度相对较高,坡面径流的稀释溶解作用较强,浓度相应较高。随降雨的持续,表层土壤矿质氮不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁移,径流养分浓度逐渐降低并趋于稳定。当降雨结束后,产流并未立即停止,径流对养分的淋洗作用减弱,而单位径流坡面汇流时间延长,增加了径流与土壤表层养分的作用时间,使得径流中矿质氮浓度增加。

雨强 0.89 mm/m in 和 1.01 mm/m in 淋失锋值的 1.5 倍(表 2)。其原因在于:小雨强降雨地表产流时间较晚,且产流初始阶段降雨强度小于水分入渗率,大量养分随入渗雨水向土层中入渗;小雨强降雨和径流对土壤的侵蚀和稀释能力较弱,随径流和泥沙流失的养分较少,导致土壤 NO<sub>3</sub>-N 在较浅位置(14 cm)处大量积累。

表 2 坡面土壤硝态氮浓度锋值分布

Table 2 Peak value distribution of soil NO<sub>3</sub>-N in slope land

雨强/mm · m in <sup>-1</sup>	土层深度/cm	硝态氮锋值/mg · kg <sup>-1</sup>
0.56	14	24.48
0.89	15	16.01
1.01	17	16.2
1.51	20	25.64

2.2 雨强对土壤矿质氮入渗的影响

2.2.1 不同雨强下土壤剖面矿质氮分布

当土壤产流发生时,土壤表层矿质氮素下渗并未停止,而随饱和水流沿土壤剖面向下迁移,农田氮素淋失以 NO<sub>3</sub>-N 为主,主要受控于土壤水分的运动和 NO<sub>3</sub>-N 的浓度梯度。地表施肥后,土壤表层 0~6 cm 处养分浓度剧增(图 3 和图 4),使得 NO<sub>3</sub>-N 淋溶规律更为明显:降雨结束后表层土壤 NO<sub>3</sub>-N 浓度最低,仅为原始未施肥土壤的 47%~68%;土壤 NO<sub>3</sub>-N 的淋溶与水分入渗并不完全同步,即浓度锋值并不位于湿润锋处,而是在土层 14~20 cm 深处,且雨强(降雨量)逾大,锋值位置越靠下。小雨强 0.56 mm/m in 土壤 NO<sub>3</sub>-N 淋失锋值与大雨强 1.51 mm/m in 十分接近,大约是两个中

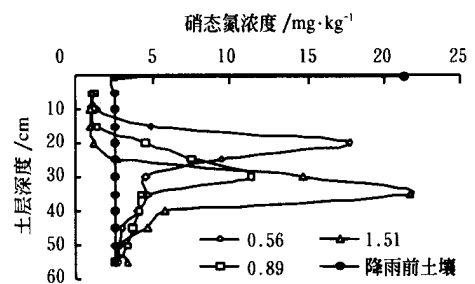


图 3 降雨结束 16 h 后土壤硝态氮剖面分布

Fig. 3 Soil nitrate distribution in profile after 16 h rainfall

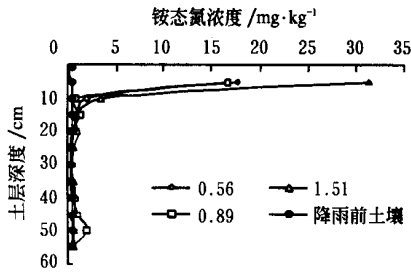


图 4 降雨结束 16 h 后土壤铵态氮剖面分布  
Fig 3 Soil ammonium distribution in profile after 16 h rainfall

与  $\text{NO}_3^- \text{N}$  不同, 土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  几乎不发生淋溶损失, 而主要溶解于径流和吸附于泥沙中。降雨后土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  浓度锋值位于 1~ 3 cm 处, 5~ 30 cm 深处浓度与原始土壤相比, 增幅很小。在 1~ 3 cm 的表层土壤中, 雨强越大, 土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  浓度锋值越大。

降雨后, 地面水层逐渐消失, 这些入渗的硝态氮在土壤剖面进行扩散、质流, 一部分硝态氮随根系延伸被

作物根系吸收利用, 一部分硝态氮淋溶到作物不能利用的深度, 污染地下水源<sup>[1]</sup>。图 3~ 4 表示降雨结束 16 h 后, 土壤剖面矿质氮浓度分布图。与降雨结束时结果相比, 雨强为 0.56、1.01 和 1.51 mm/min 试验中, 降雨结束 16 h 后土层硝态氮浓度锋值深度分别下移了 6 cm、14 cm 和 15 cm, 锋值以下深度土层浓度也有所增加; 土壤  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  浓度锋值深度几乎无任何变化, 只是锋值以下深度土层浓度略有增加。

2.2.2 相同雨强下同一坡面硝态氮空间分布

供试土壤经过充分混匀并人工回填至土槽, 坡面上层土壤养分含量一致。降雨结束后整个坡面土壤硝态氮分布呈现空间分异性, 表现为: (1) 各剖面土壤硝态氮在表层 1~ 5 cm 含量较低, 在 10~ 20 cm 内急剧增加, 达到锋值后又逐渐降低; (2) 沿坡面等距离所测定的 5 个剖面土壤  $\text{NO}_3^- \text{N}$  浓度锋值深度不同, 表现为坡中下部最深, 坡顶部和坡底部较浅(表 3)。

表 3 土壤坡面硝态氮浓度锋值分布

Table 3 Peak value distribution of soil  $\text{NO}_3^- \text{N}$  in soil slope

距坡顶距离 /cm	0.56 mm/min		1.01 mm/min		1.51 mm/min	
	土层深度/cm	硝态氮锋值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土层深度/cm	硝态氮锋值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土层深度/cm	硝态氮锋值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
64	11	24.09	15	16.68	19	27.19
127	13	21.95	16	16.53	20	23.76
190	14	24.48	17	16.15	20	25.64
253	11	24.46	16	16.25	21	24.63
316	11	24.65	15	14.89	19	22.28

土壤硝态氮在坡位分布的差异一方面反映了坡面径流的侵蚀力、土壤组成及其理化性质在降雨过程中存在着空间变化, 另一方面揭示土壤养分入渗是一个动态变化过程, 不仅受控于土壤质地、土壤水分运动等, 还受到养分浓度梯度等影响。土壤硝态氮在降雨过程中既随入渗雨水向土层深处, 又随壤中流沿坡面向低浓度处侧渗。在坡面顶部, 土壤硝态氮侧渗补给较少, 主要以淋溶损失为主; 在坡面中下部, 土壤硝态氮侧渗和入渗使浓度锋值位置达到最深; 在坡面底部, 土层和雨水中养分侧渗补给量逐渐增大, 导致硝态氮锋值位置逐渐升高。

2.3 雨强对土壤养分与径流有效混合深度 (ED I) 的影响

在一场降雨过程中, 径流冲刷使表土流失, 下层土壤失去了保护层并与雨水形成水土混合体, 其土壤溶质更易在雨滴的击溅作用和径流的冲刷解吸下随地表径流流失。因此, 参与径流损失的土壤溶质除了存在于表层易剥蚀土壤中, 还包括 ED I 内的土壤溶质。本试验把降雨结束后土壤矿质氮素浓度曲线第一个拐点所处的深度作为 ED I, 理由如下: 土体水分含量一般控制在 10% 左右, 降雨前表施硝酸铵, 不易在降雨前发生入渗。降雨和径流过程中, 表层硝酸铵随降雨和径流水体向土体内入渗, 而这种入渗是在径流与表土充分混合下进行, 因此 ED I 深度应在降雨结束后水分入渗深度以内。

产流结束后, 土体剖面硝态氮浓度分布曲线一般有三个拐点(硝态氮浓度急剧变化之处)。第一个拐点是径流与土层养分作用的深度 (ED I), 在 ED I 深度内, 硝态氮运动方向有两种途径。其一, 施入的硝态氮一方面在入渗的同时并与径流发生作用, 受到径流的冲刷和浸提, 向径流水体中释放; 其二, 在径流与土体作用的同时, 在高浓度硝酸铵和薄层径流水位下, 势必会发生入渗; 第二个拐点出现在硝态氮入渗锋处, 在第一和第二个拐点之间, 土壤中的硝态氮不受径流的作用, 仅受浓度和水势梯度的影响; 第三拐点为硝态氮入渗深度, 由于土体对硝态氮的吸附和过滤, 水分入渗与硝态氮入渗并不同步, 水分入渗在先, 而硝态氮入渗滞后, 本试验也证明了这一点。有效混合深度 (ED I) 定义为参与养分径流损失的土壤厚度, 该名词具有明确的物理意义, 主要在养分流失模型中应用, 但迄今为止, 尚未有人在试验中得到验证。ED I 精确的确定一般需通过  $^{15}\text{N}$  标记示踪试验和反推计算(根据流失量与产流前后土壤剖面养分浓度的变化关系)来确定。在未施肥径流试验中, 通过反推计算出的 ED I 与施肥试验基本一致, 其研究结论另文报道。由表 4 知, 同一坡面不同坡位 ED I 大小不一样, 基本都是坡中下部最深, 坡顶和坡脚较浅。这是由于地表径流沿坡面向下流量和流速逐渐增大, 对中下部坡位土壤搬运冲刷较强, 与土壤溶质的相互作用强度较大。雨强越大, 雨滴对土壤溶质的击溅作用和径流的冲刷解吸越强, 坡面平均 ED I 值越大。

表 4 径流与土壤硝态氮作用深度 (ED I)

Table 4 Effective depth of interaction between runoff and soil  $\text{NO}_3^- \text{N}$ 

距坡顶距离 /cm	降雨/ $\text{mm} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$			
	0.56	0.89	1.01	1.51
64	5.5	6.5	10.5	11.5
127	5.5	6.5	10.5	12.5
190	6.5	7.5	12.5	12.5
253	6.5	8.5	11.5	13.5
316	4.5	8.5	10.5	12.5

### 3 结论与讨论

综上所述,降雨(降雨强度)和径流是土壤溶质迁移的动力<sup>[12]</sup>,对土壤矿质氮素随径流流失和入渗有着重要影响,具体表现为雨强增大,土壤矿质氮素流失量、与径流作用深度(ED I)和土壤硝态氮入渗锋值深度均增加。坡面径流侵蚀力和养分入渗在降雨过程和不同坡位存在着时空变化,导致了不同时段径流养分浓度、不同坡位养分分布和 ED I 的差异。土壤溶质与降雨、地表径流的相互作用是一个复杂的动态变化过程,受到众多因素的影响,如降雨特性、下垫面条件、土壤质地、溶质的物理化学性质及环境温度等。目前对 ED I 的精确描述尚存在一定的难度,仍需要从分析径流与土壤溶质的作用机理着手,在研究方法和技术手段上进行革新,以求有所突破。

#### [参考文献]

[1] 张兴昌 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J] 地理科学进展,2000,6: 128- 133

- [2] 王全九,沈晋 降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移试验研究[J] 水土保持学报,1993,7(1): 11- 17
- [3] 王全九,邵明安 黄土区农田溶质径流过程模拟方法分析[J] 水土保持研究,1999,6(2): 67- 71, 104
- [4] Ahuja L R, Sharpley A N. The depth of rainfall-runoff-soil interactions as determined by  $^{32}\text{P}$  [J]. Water Resour Res, 1981, 17: 967- 974
- [5] Rony Wallach The concept of convective mass transfer for predicting of surface runoff pollution by soil surface applied chemicals[J] Trans ASA E, 1989
- [6] Rony Wallach Transfer of chemical from solution to surface runoff: A diffusion-based soil model[J] Soil Sci Soc Am J, 1988, (52): 612- 618
- [7] 符素华,刘宝元 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J] 地球科学进展,2002,17(1): 78- 84
- [8] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS2000: Nonpoint-source nutrient planning model[J] J Environ Engng ASCE, 2000, 122(11): 1045- 1055
- [9] 胡雪涛,陈吉宁,张天柱 非点源污染模型研究[J] 环境科学,2002,23(3): 124- 128
- [10] Lowell E Gentry, Mark B. David, Karen M. Smith-Starks, et al Nitrogen fertilizer and herbicide transport from tile drained field[J] J Environ Qual, 2000, (29): 232- 240
- [11] Waddell J T, Gupta S C, Moncrief J F, et al Irrigation and nitrogen-management impacts on nitrate leaching under potato[J] J Environ Qual, 2000, (29): 251- 261
- [12] 张兴昌,邵明安 水蚀条件下土壤氮素径流流失的影响因素[A] 邵明安 土壤物理与生态环境建设研究文集[C] 西安: 陕西科学技术出版社,2001, 253- 262

## Impact of rainfall intensity on soil mineral nitrogen loss by runoff on loess slope

Zhang Yali, Zhang Xingchang, Shao Ming'an, Li Shiqing

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, 712100, China)

**Abstract:** According to the result of simulated runoff experiment in laboratory, the dynamic movements of the mineral nitrogen's transport by surface runoff and leaching are studied. Meanwhile, the Effective Depth of Interaction (ED I) of runoff with soil mineral nitrogen is analyzed and confirmed. It is validated that the process of soil nitrogen loss by erosion is restricted by interaction of soil nitrogen with rainfall and runoff. There are much more soil mineral nitrogen loss by runoff than that by sediment. The concentration of soil mineral nitrogen loss in runoff wavelike changes, firstly achieving peak value, then gradually descending and increasing again after the rainfall ceased. Runoff and rainfall intensity are considered as the important drivers for the mineral nitrogen's transport in surface runoff and leaching. The more the rainfall intensity is, the more the amount of soil nitrogen loss by erosion, the depth of peak value of soil  $\text{NO}_3^- \text{N}$  concentration and the ED I. The observations of the temporal and spatial distribution of mineral nitrogen on the loess slope show, that there are different spatial distribution of the soil  $\text{NO}_3^- \text{N}$  and the ED I, deepest in the middle and lower parts of the slope land, while shallower in the upper and bottom parts. It is proved that the infiltrating processes between soil  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- \text{N}$  after the rainfall are distinct different.

**Key words:** rainfall intensity; soil mineral nitrogen; loess slope; loss by runoff