

安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 王彬. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响. 生态学报 2011, 31(24): 7579-7590.

An J, Zheng F L, Li G F, Wang B. Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(24): 7579-7590.

## 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对 黑土坡面养分流失的影响

安娟<sup>1,3</sup>, 郑粉莉<sup>1,2,\*</sup>, 李桂芳<sup>1,3</sup>, 王彬<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**目前, 土壤水分饱和和壤中流条件下, 雨滴打击对养分流失的影响尚不清楚。通过 3 个近地表土壤水文条件(自由入渗、土壤水分饱和与壤中流)下, 土槽上方架设与不架设尼龙纱网模拟降雨对比试验, 研究雨滴打击对黑土坡面侵蚀过程及  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  随径流和侵蚀泥沙迁移的影响。结果表明, 纱网覆盖消除雨滴打击后坡面侵蚀量和泥沙浓度分别减少 59.4%—71.6% 和 57.3%—73.0%, 不同水文条件下减少量的排序为: 自由入渗 > 壤中流 > 土壤水分饱和。消除雨滴打击后养分随径流流失的减少仅在自由入渗条件下体现较明显, 该水文条件下  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  流失分别减少 33.3%、23.1% 和 40.7%; 3 种水文条件下, 消除雨滴打击均明显减少养分随泥沙的流失, 其中自由入渗条件下减少效果最明显, 该水文条件下,  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  流失分别减少 20.9%—54.9% 和 25.0%—62.3%, 而  $\text{PO}_4\text{-P}$  流失减少在 74.6% 以上。雨滴打击增大了  $\text{NO}_3\text{-N}$  的淋失, 但对  $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  的淋失几乎无影响。消除雨滴打击后, 自由入渗条件下养分的等效径流迁移深度减少 26.7%—42.6%, 而土壤水分饱和与壤中流条件下基本无变化。以上研究结果为有效防治坡面土壤侵蚀和农业非点源污染提供科学理论依据, 尤其是在壤中流出现的地方。

**关键词:** 土壤水分饱和; 壤中流; 雨滴打击; 土壤侵蚀过程; 养分流失

## Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope

AN Juan<sup>1,3</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2,\*</sup>, LI Guifang<sup>1,3</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil erosion is largely initiated by raindrop impact on soil surface. Raindrop impact not only disperses soil material, but also enhances the disturbance of runoff, thus significantly affects soil erosion processes and nutrient losses. However, few investigations have addressed the effect of raindrop impact on soil loss and nutrient loss under soil saturated and seepage conditions. A laboratory study was designed to quantify effect of raindrop impact on soil erosion processes and nutrient losses ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) of black soil in the Northeast China under different soil surface water regimes. Three soil surface water regimes were tested: freely draining soil profile with rainfall (FD), saturated soil water profile with rainfall (Sa) and seepage under 20 cm hydrologic pressure with rainfall (SP). Under each hydraulic condition, two surface cases were included with and without raindrop impact through placing nylon net over soil pan. Results showed that the

基金项目: 国家 973 计划项目(2007CB407201)

收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2011-10-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

elimination of raindrop impact greatly reduced soil loss and sediment concentration by 59.4%—71.6% and 57.3%—73.0%, respectively, and the reduction effect were in order FD>SP>Sa. Effect of raindrop impact on nutrient losses by runoff was only pronounced for FD treatment, and  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  losses by runoff reduced by 33.3%, 23.1% and 40.7% after eliminating raindrop impact for FD treatment, respectively. However, the elimination of raindrop impact greatly decreased nutrient losses by soil loss for all soil surface water regimes, among the reduction effect was the most pronounced for FD treatment,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  were with decrease rate of 20.9%—54.9% and 25.0%—62.3%, respectively, while  $\text{PO}_4\text{-P}$  loss reduced by above 74.6%. Raindrop impact enhanced  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching, while it had no obvious influence on  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$  leaching. After eliminating raindrop impact, for FD treatment, the effective depth of transport by runoff of nutrient decreased by 26.7%—42.6%, while for Sa and SP treatments, it varied slightly. These findings supply scientific support to control soil erosion and non-point source pollution on slope, especially the place where seepage flow occurs.

**Key Words:** soil saturated; seepage condition; raindrop impact; runoff and sediment yield; nutrient losses

雨滴打击不仅使土粒产生分散和移动,为坡面径流搬运提供侵蚀物质,还通过增强坡面薄层水流的扰动而增加径流的挟沙能力,因此雨滴打击对坡面侵蚀的分离和搬运过程均有重要影响<sup>[1-4]</sup>。Meyer<sup>[5]</sup>研究了降雨能量对细沟侵蚀的影响,结果表明消除雨滴打击后细沟侵蚀量减少50%。郑粉莉<sup>[6]</sup>等通过纱网覆盖消除雨滴打击后发现在较小雨强时5—20°坡面上不发生细沟侵蚀,且坡面总侵蚀量减少35%—61%;而在较大雨强时,坡面细沟侵蚀量减少38%—64%,坡面总侵蚀量减少31%—55%。雨滴打击使吸附于土壤颗粒上的养分发生解吸,从而使进入径流中的养分浓度升高;同时,雨滴打击分散颗粒影响着土壤入渗、孔隙封闭及结皮的形成,从而影响养分的淋溶。Ahuja<sup>[7]</sup>等的研究表明,雨滴打击通过增强养分的混合和扩散,可显著增加养分从土壤溶液到径流的迁移。

自由入渗、土壤水分饱和与壤中流3种水文条件之间是有关联的,它们代表了坡面不同部位的土壤水分状况<sup>[8]</sup>。坡顶或坡上部一般发生自由入渗,当土壤水分达到饱和之后,坡下部或坡脚处常会出现壤中流。很多研究表明<sup>[9-11]</sup>随壤中流流失的溶解态和吸附态养分是农业非点源污染的最大来源,控制坡面壤中流的形成是减少农业养分流失的关键所在。壤中流的形成减少了土壤颗粒间的粘结力,降低了土壤抗侵蚀能力,增大了侵蚀强度从而对作物产量产生影响。因此,研究壤中流条件下坡面侵蚀机理及其养分流失过程有重要的理论和实践意义。东北黑土区是我国主要商品粮产区,严重的水土流失直接威胁着国家的粮食战略安全。乱砍乱伐致使很多土地得不到植被的保护,雨滴打击所导致的溅蚀在黑土区普遍存在<sup>[12-13]</sup>,但关于雨滴击溅及输移泥沙的研究非常缺乏<sup>[14]</sup>。黑土层下面为黄土状亚黏土或湖相沉积物,质地较为黏重,长期耕作形成了坚硬的犁底层,夏季降水集中时易产生地表径流和渗出流,极易形成“上层滞水”现象,土体容易受到侵蚀和淋溶影响;早春冻融交替致使壤中流很容易形成。据中国科学院东北地理与农业生态研究所的观测资料表明,东北黑土区壤中流在丰水年可达到总径流量的20%;初春的融雪侵蚀中,壤中流也占到融雪量的较大比例。东北黑土区地形最显著的特点之一就是坡长长,坡长一般为500—1000 m,最长可达2000 m,因此壤中流现象较普遍。目前,已有的研究仅解释了自由入渗条件下,消除雨滴打击对坡面侵蚀的减少作用以及“混合深度”确定,尚不清楚土壤水分饱和与壤中流条件下,雨滴打击是如何影响坡面侵蚀和养分流失。本文通过3个水文条件下(自由入渗、土壤水分饱和与壤中流),土槽上方架设与不架设尼龙纱网的模拟降雨对比试验,分析不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面侵蚀过程及养分流失的影响,为黑土区坡面尤其是壤中流出现地方的水土保持措施配置与农业非点源污染防治控制提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

降雨试验在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人工模拟

降雨大厅进行。降雨设备为侧喷式人工降雨装置,采用 2 组单喷头对喷,降雨高度为 16 m,雨滴直径与雨滴分布与天然降雨的相似<sup>[15]</sup>。试验用土均为黑土(20cm 耕层土),采自吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯(北纬 44°43'28" 东经 126°11'47")。其中 pH 值为 5.92,粘粒、粉粒与砂粒含量分别为 20.30%、76.38% 和 3.32%。硝态氮、铵态氮和水溶性磷含量分别为 18.08、16.01 mg/kg 和 1.48 mg/kg。试验土风干后未过筛,沿自然节理将其掰成小于 4 cm 的土块以保持原有的土壤结构。

试验所用土槽尺寸规格为:长×宽×高=100cm×50cm×45cm,下端设集流装置采集径流泥沙样,土槽底板均匀打孔,用于模拟天然透水底面。供水装置由恒压箱和供水系统组成,供水管连接试验土槽底部。利用土壤毛细管吸水原理,通过稳压供水装置对试验土槽从下而上供水。具体试验装置见图 1。

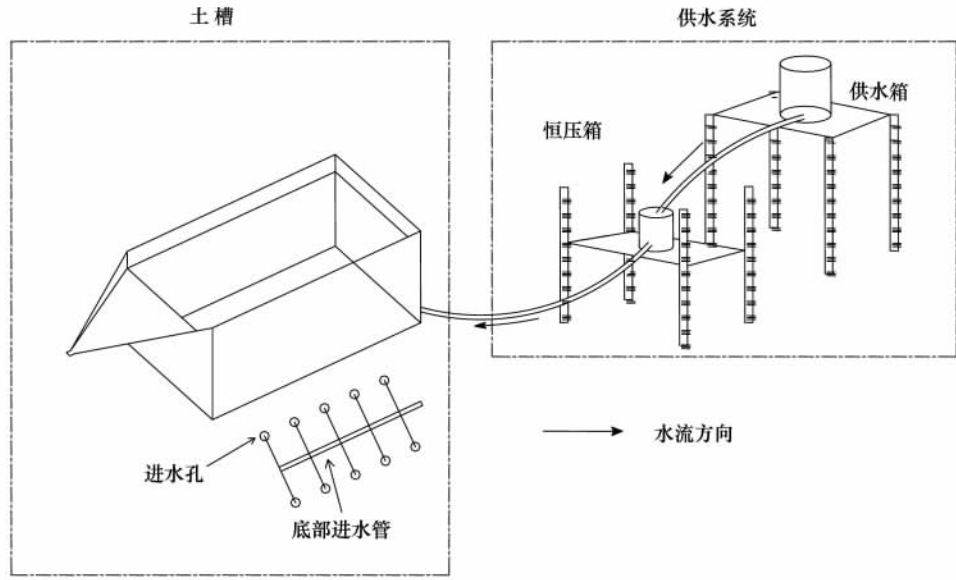


图 1 模拟试验装置

Fig.1 The experimental equipment

### 1.2 试验设计

针对东北黑土区坡面不同部位的水文机制并结合野外实际观测情况,本文设计了 3 个水文条件:自由入渗(FD)、土壤水分饱和(Sa)与壤中流(SP)。小区上方架设尼龙纱网(孔径约 1 mm×1 mm),纱网距土槽表层高度 10 cm。色斑法测定架设与不架设纱网翻耕裸露地处理的雨滴直径,发现纱网覆盖后雨滴动能被消除 99.6%<sup>[16]</sup>。东北典型薄层黑土区坡耕地的坡度一般为 1—7°,很少有超过 10°,因此本文设计的试验坡度为 5°。降雨强度是结合当地侵蚀性降雨标准进行设计。设计历时为 1h 的 60 mm/h 降雨强度的次侵蚀性降雨,此降雨强度可引起强度以下坡耕地土壤侵蚀。肥料类型(尿素和过磷酸钙)和施肥量是根据当地实际调查情况确定。具体试验设计见表 1。

表 1 试验设计

Table 1 Design of experimental treatments

处理 Treatment	土壤水文条件 Soil surface hydraulic conditions	重复次数 Number of replications	施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Fertilizer input rate
无纱网覆盖 Without nylon net cover	FD	2	
	Sa	3	
	SP	3	氮: 200
纱网覆盖 With nylon net cover	FD	2	磷: 90
	Sa	3	
	SP	3	

FD: 自由入渗; Sa: 土壤水分饱和; SP: 壤中流

自由入渗处理为不供水,让水在重力作用下自由入渗。当供水水头的高度与土槽表面最低点平行,土槽表面有充分积水时,认为满足土壤水分饱和条件。当供水水头的高度高出土槽表面最低点 20 cm,试验土槽出口有水匀速流出时,即达到壤中流条件。土壤水分饱和与壤中流条件下,降雨过程中始终保持设定的水头高度进行稳压供水直至降雨结束。

### 1.3 试验步骤

为保证良好的透水性,试验土槽底部铺 10 cm 厚细沙。细沙上部按照  $1.20 \text{ g/cm}^3$  的容重每 5 cm 一层填装黑土,装土厚度为 25 cm。填装上层土之前,用 1 cm 厚的木板抓毛下层土壤表面,防止土层之间出现分层现象。称取所需填装表层 0—2 cm 的土,再称取 21.4 g 尿素(含氮 46%)和 64.7 g 过磷酸钙(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  16%),并充分搅拌混匀。每次降雨准备 4 个同样的土槽,2 个用于预降雨后水分和养分剖面观测,另外 2 个用于降雨试验。为减少试验土槽表面的变异性和确保每次试验前土壤含水量一致,利用 20 mm/h 降雨强度进行前期预降雨。预降雨过程中将 1 mm × 1 mm 尼龙纱网覆盖在土槽之上以减弱雨滴打击力。

预降雨结束 24 h 后进行降雨强度为 60 mm/h 的模拟降雨。坡面产流后,每隔 2 min 采集一次径流泥沙样,待径流稳定后取样间隔增加到 5 min,整个降雨过程持续 60 min。每次降雨过程中收集 100—200 mL 雨水,用于测定雨水中养分背景值。降雨完成后,待径流样称重后取径流上清液 100 mL,过滤后储存在 4℃ 的冰箱中,以备养分含量测定;泥沙样品 55℃ 下烘干称重。降雨试验前,在供采集土样的试验土槽 25、50 cm 和 75 cm 处按 0—1、1—2、2—5、5—10、10—15 cm 和 15—20 cm 土层深度分别采集土壤样品,并将同一采样深度的土样混合,用同样的方法采集降雨后试验土槽的土样。

### 1.4 养分化学分析

径流样过滤处理后,用流动分析仪直接测定其中  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度,钼蓝比色法紫外分光光度计测定可溶性  $\text{PO}_4\text{-P}$  的浓度。土样和泥沙样品研磨后过 1 mm 筛,以蒸馏水为浸提液,按水土(质量比) 10:1 混合,振荡 30 min 后,用高速离心机离心 10 min (8000 r/min),上清液过滤后用流动分析仪直接测定其中  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度,钼蓝比色法紫外分光光度计测定其  $\text{PO}_4\text{-P}$  的浓度。

### 1.5 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 随径流和侵蚀泥沙流失的计算

对于每场降雨,地表径流中养分的流失量用下式计算:

$$L = \sum_{i=1}^n C_i \times R_i \quad (1)$$

式中,  $L$  为一场降雨地表径流中养分的流失量 (mg);  $C_i$  为地表径流中养分的浓度 (mg/L);  $R_i$  为第  $i$  的径流体积 (L);  $n$  为采集样品的总个数。

对于每场降雨,侵蚀泥沙中养分的流失量用下式计算:

$$L_s = \sum_{i=1}^n C_s \times M_s \quad (2)$$

式中,  $L_s$  为一场降雨侵蚀泥沙中养分的流失量 (mg);  $C_s$  为侵蚀泥沙中养分的浓度 (mg/kg);  $M_s$  为第  $i$  的泥沙量 (kg);  $n$  为采集样品的总个数。

### 1.6 流速与径流深计算

为防止染色剂对养分测定造成影响,利用 GUY<sup>[17]</sup> 推导的公式(3) 计算流速。

$$v = \left[ \frac{\gamma s}{3\mu} \right]^{\frac{1}{3}} q^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

式中,  $v$  为平均流速 (m/s);  $\gamma$  为水的比重 ( $\text{kg/m}^3$ );  $s$  为水力坡度 ( $\sin\theta$ );  $\mu$  为粘滞性系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $q$  为单宽流量 ( $\text{m}^3/\text{m/s}$ )。

根据公式(3) 计算所得流速,利用公式(4) 计算得出径流深:

$$h = \frac{Q}{\nu B t} \quad (4)$$

式中,  $h$  表示为径流深 (m);  $Q$  为  $t$  时间内的径流量 ( $\text{m}^3$ );  $B$  为水流宽度 (m);  $t$  为采样时间 (s)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对径流量与侵蚀量的影响

从表 2 得知,自由入渗条件下无纱网的径流量为 33.7 mm,径流系数为 0.56,纱网覆盖消除雨滴打击后径

流量减少了 15.4%。强降雨后土壤剖面湿润峰深度 13 cm, 降雨结束后无纱网与纱网覆盖下的湿润峰深度分别为 17 cm 和 19 cm。可见, 消除雨滴打击后, 土壤入渗率和入渗深度都有所增加。土壤水分饱和与壤中流条件下, 降雨几乎全部转化成径流, 因此径流量在消除雨滴打击后未发生明显变化。

表 2 不同近地表土壤水文条件下径流量与侵蚀量

Table 2 Runoff and soil loss under different soil surface hydraulic conditions

水文条件 Soil surface hydraulic conditions	径流量/mm Runoff		泥沙量/(g/m <sup>2</sup> ) Sediment yield		产沙率/(g/min) Sediment yield rate		泥沙浓度/(g/L) Sediment concentration	
	无纱网	纱网覆盖	无纱网	纱网覆盖	无纱网	纱网覆盖	无纱网	纱网覆盖
FD	33.7	28.5	53.6	15.2	0.46	0.14	1.59	0.43
Sa	51.4	51.6	59.8	25.4	0.54	0.24	1.29	0.55
SP	60.3	57.1	90.2	26.5	0.81	0.21	1.54	0.53

与消除雨滴打击后的削减径流作用相比, 其减沙作用更为明显。自由入渗条件下, 消除雨滴打击后侵蚀量减少了 71.6%, 这与郑粉莉<sup>[16]</sup>的研究结果一致。土壤水分饱和与壤中流条件下的减沙效益分别为 59.4% 和 70.6%。可见, 3 种水文条件下, 消除雨滴打击均明显减少了侵蚀量。纱网覆盖消除雨滴打击后, 自由入渗条件下, 产沙率和泥沙浓度分别减少 69.6% 和 73.0%; 土壤水分饱和条件下, 相应的减少率分别为 55.6% 和 57.3%; 壤中流条件下, 相应的减少率分别为 74.1% 和 65.6%。上述研究结果进一步表明雨滴打击对土壤颗粒分散有重要贡献。

图 2 描述了不同土壤水文条件下径流泥沙浓度随降雨历时的变化。自由入渗条件下, 无纱网覆盖下, 径流泥沙浓度随降雨历时呈现急剧下降后又缓慢增加的趋势; 纱网覆盖下, 呈现逐渐下降后趋于稳定的趋势。土壤水分饱和与壤中流条件下, 无纱网与有纱网覆盖下, 径流泥沙浓度随降雨历时均呈现逐渐下降并在降雨 20 min 后趋于稳定。进一步分析发现, 在降雨 20 min 后, 自由入渗条件下, 无纱网与纱网覆盖之间的泥沙浓度差异随降雨的进行逐渐增大, 而土壤水分饱和与壤中流条件下, 该差异趋于稳定。以上研究结果表明, 雨滴打击对土壤侵蚀过程的影响与土壤水文条件紧密相关。纱网覆盖消除雨滴打击的减沙效益在降雨后期较佳, 泥沙浓度减少率达到 50.0%—82.2%。说明虽然雨滴对土壤颗粒的分散主要在降雨初期体现, 却为后来径流搬运提供了丰富的物质来源。

## 2.2 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对养分流失的影响

为探讨雨滴打击对养分流失的影响, 本文分析了无纱网与纱网覆盖下养分随径流和泥沙的流失。利用公式(1)和(2)分别计算出养分随径流和侵蚀泥沙的流失量, 其中径流中养分的浓度已扣除雨水背景值浓度(雨水中硝态氮、铵态氮和水溶性磷含量分别为 7.02、0.124 mg/L 和 0.0013 mg/L)。从图 3 和图 4 中可看出, 纱网覆盖消除雨滴打击后, 养分随径流和泥沙的流失量均明显减少。与养分随径流流失相比, 雨滴打击对养分随泥沙流失的影响更为明显。

当水文条件从土壤自由入渗过渡到土壤水分饱和, 再到壤中流时, 纱网覆盖下 NO<sub>3</sub>-N 随径流的流失量分别为 0.08、0.83 kg/hm<sup>2</sup> 和 3.33 kg/hm<sup>2</sup>, 较无纱网下分别减少 33.3%、-10.67% 和 -3.4%; 纱网覆盖下 NH<sub>4</sub>-N 随径流的流失量分别为 0.10、0.23 kg/hm<sup>2</sup> 和 0.42 kg/hm<sup>2</sup>, 较无纱网下分别减少 23.1%、14.1% 和 2.4%; 纱网覆盖下 PO<sub>4</sub>-P 随径流的流失量分别为 27.7、100.5 kg/hm<sup>2</sup> 和 124.2 g/hm<sup>2</sup>, 较无纱网下分别减少 40.7%、1.5% 和 5.4%。以上研究结果表明, 自由入渗条件下消除雨滴打击对养分随径流流失的减少效果最明显, 这是因为消除雨滴打击后径流量减少造成的。

当水文条件从土壤自由入渗过渡到土壤水分饱和, 再到壤中流时, 纱网覆盖下 NO<sub>3</sub>-N 随泥沙的流失量分别为 11.77、20.04 g/hm<sup>2</sup> 和 39.06 g/hm<sup>2</sup>, 比无纱网下分别减少 54.9%、41.7% 和 20.9%; NH<sub>4</sub>-N 随泥沙的流失量分别为 2.79、6.17 g/hm<sup>2</sup> 和 9.72 g/hm<sup>2</sup>, 比无纱网下分别减少 62.3%、51.7% 和 25.0%; PO<sub>4</sub>-P 随泥沙的流失量分别为 0.06、0.46 g/hm<sup>2</sup> 和 0.54 g/hm<sup>2</sup>, 比无纱网下分别减少 94.0%、74.6% 和 75.6%。可见, 消除

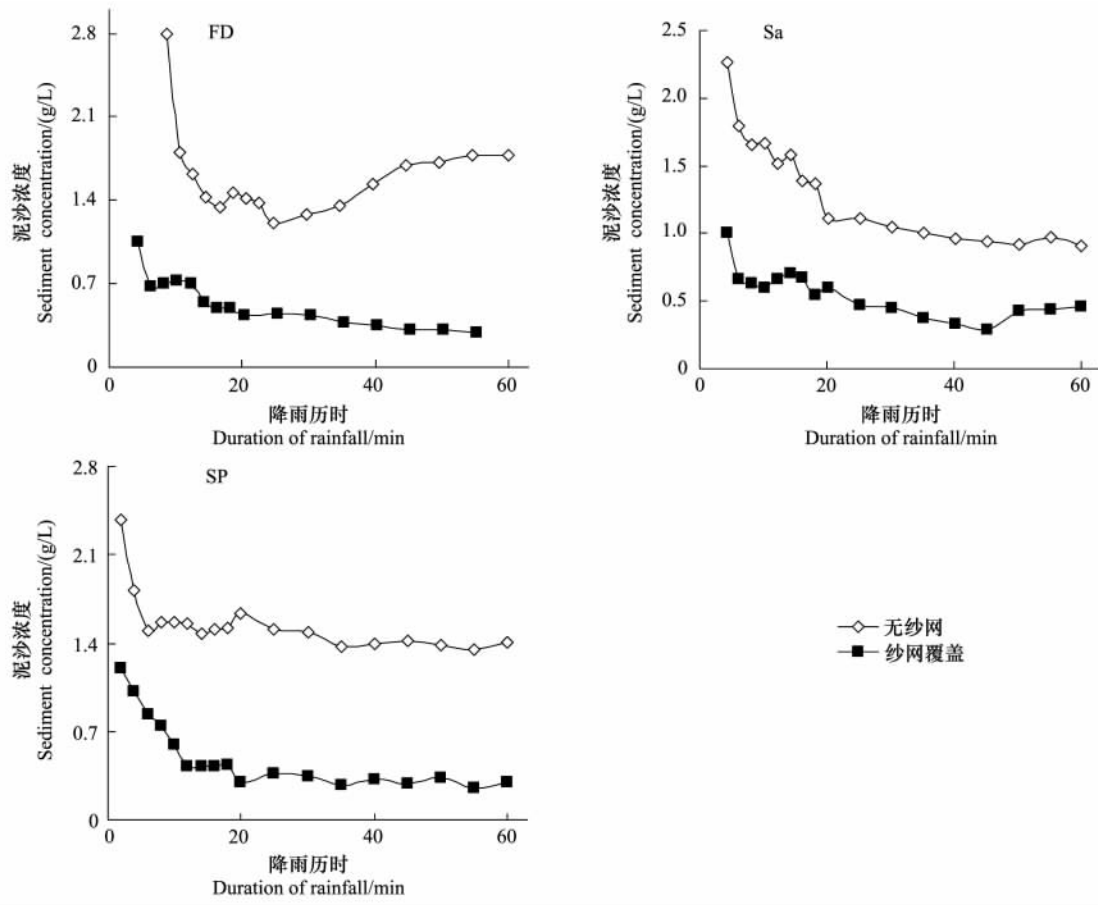


图2 径流泥沙浓度随降雨历时的变化

Fig. 2 Sediment concentration as a function of duration of rainfall

雨滴打击后养分随泥沙的流失明显减少,其中自由入渗条件下流失减少效应最明显。进一步分析发现,与雨滴打击对  $\text{NO}_3\text{-N}$  流失的影响相比,其对  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  流失的影响更明显。这是由于  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  易被土壤吸附,富集比高。

### 2.3 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对养分淋溶的影响

降雨条件下,养分不仅随径流泥沙迁移,还随入渗水分向土壤深层迁移。雨滴打击在减少土壤入渗的同时还加大了吸附于土壤颗粒表面的养分的解吸,因而会对养分的淋溶造成一定影响。图5描述了不同水文条件下  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  的剖面分布。由图5可见,纱网覆盖消除雨滴打击后养分的剖面分布趋势未发生明显改变。自由入渗条件下,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度随土壤深度增加而增加,这是因为  $\text{NO}_3\text{-N}$  是非吸附性物质易随水分的移动而迁移;土壤水分饱和与壤中流条件下,呈现先增加后减少的趋势。3种水文条件下,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度随土壤深度增加均呈现先增加后减少的趋势;  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度随土壤深度增加均呈现先增加后减少并趋于稳定,主要集中于施肥层内,几乎未发生淋溶。

张亚丽<sup>[18]</sup>研究了自由入渗条件下秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮随径流流失的影响,发现秸秆覆盖提高了  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失峰值浓度,但不能促进  $\text{NH}_4\text{-N}$  淋失,本文的研究结果也表现出同样的趋势。自由入渗与土壤水分饱和条件下,纱网覆盖下  $\text{NO}_3\text{-N}$  的累积深度与无纱网下相同,但累积深度内的养分含量却高于无纱网下;壤中流条件下,纱网覆盖下  $\text{NO}_3\text{-N}$  的累积深度为10—15cm,较无纱网下增加5cm,且该层内含量高于无纱网下。3种水文条件下,无纱网与纱网覆盖下  $\text{NH}_4\text{-N}$  的累积深度为5—10cm,深于施肥层;自由入渗与土壤水分饱和条件下,无纱网与纱网覆盖之间累积深度内  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量差异不明显,但壤中流条件下,纱网覆盖下累积深度内  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量较无纱网下减少22.4%。Galloway<sup>[19]</sup>认为当土壤对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸附达到饱和时,  $\text{NH}_4\text{-N}$  也

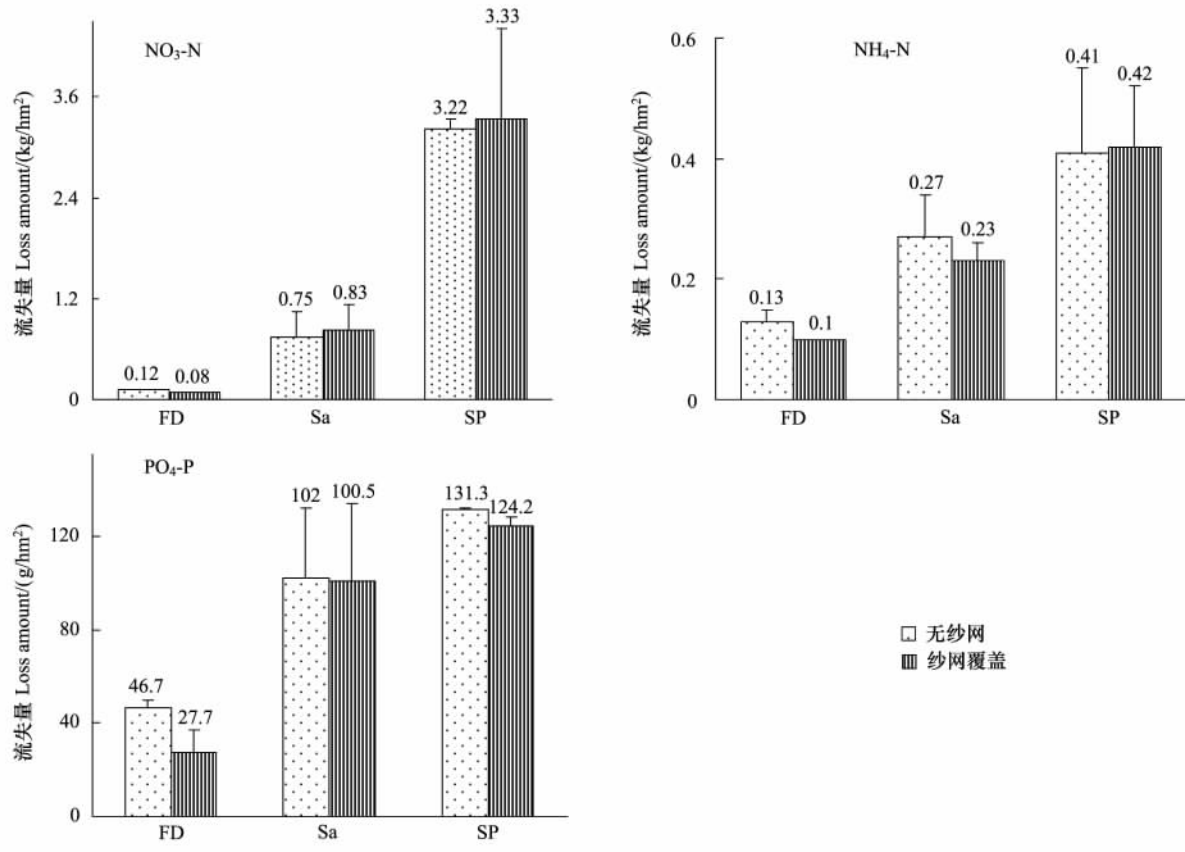


图3 雨滴打击对养分随径流流失的影响

Fig. 3 Effect of raindrop impact on nutrient losses by runoff

会被淋洗而进入水体,这与本文的研究结果一致。3种水文条件下,无纱网与纱网覆盖下 $\text{PO}_4\text{-P}$ 累积深度均为1—2cm,且无纱网与纱网覆盖之间累积深度内的含量差异表现出与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相同的趋势。以上研究结果表明,壤中流条件下雨滴打击对养分累积深度及此深度内含量的影响更为明显。

#### 2.4 混合深度的确定

降雨条件下土壤在雨滴打击及径流冲刷作用下,形成一定深度的混合层,一般在0—10mm之间<sup>[20-21]</sup>。混合层内溶质参与径流迁移,而此层以下溶质不参与径流迁移。王全九<sup>[22]</sup>等提出了等效径流迁移深度(EDR)概念,建立了只考虑土壤溶质地表迁移总量的等效径流迁移深度模型:

$$EDR = \frac{W}{\rho CA} \quad (5)$$

式中, $EDR$ 为等效径流迁移深度(mm); $W$ 为径流迁移溶质总量(mg); $\rho$ 为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $C$ 为土壤溶质初始含量( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $A$ 为土壤面积( $\text{m}^2$ )。

以往的研究主要集中于自由入渗条件下混合层深度的确定,土壤水分饱和与壤中流条件下溶质混合层深度的研究还是空白。本文利用公式(5)计算出不同近地表土壤水文条件下养分等效径流迁移深度,列于表3。由表3得知,无论是无纱网还是纱网覆盖下,当水文条件从自由入渗过渡到土壤水分饱和再到壤中流,养分的等效径流迁移深度均逐渐增加。养分物质随水分的移动性越强,其等效径流迁移深度越大, $EDR_{\text{NO}_3\text{-N}} > EDR_{\text{NH}_4\text{-N}} > EDR_{\text{PO}_4\text{-P}}$ ,这与张兴昌<sup>[23]</sup>的研究结果一致。土壤水分饱和与壤中流条件下, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的 $EDR$ 都大于10mm,说明模型中不能简单用10mm代替整个混合层深度,土壤溶质迁移量同土壤水文条件有着密切关系。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的 $EDR$ 都小于4mm,说明混合层深度确定与化学物质特性有重要关系。田坤<sup>[24]</sup>等利用人工模拟地表径流(供水槽对土槽供水),研究自由入渗、土壤水分饱和与壤中流3种水文条件下氯化物的迁移,

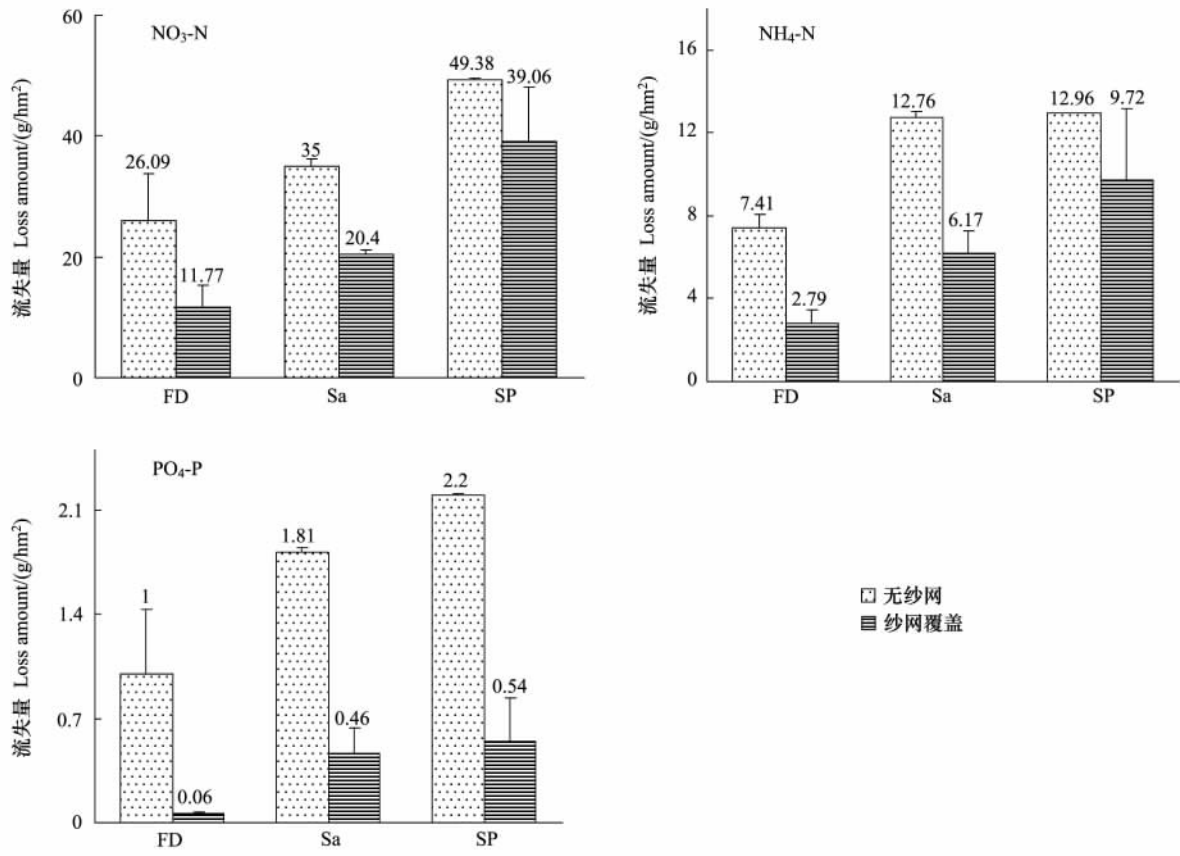


图4 雨滴打击对养分随泥沙流失的影响

Fig. 4 Effect of raindrop impact on nutrient losses by soil loss

发现土壤水分饱和和下混合层深度在 0.93—4.5 mm, 壤中流条件下表现为整个土层都为混合层, 与本文的研究结果差异较大。一方面本试验是在降雨下进行的, 雨滴打击加强了养分的解吸释放, 因此增大了土壤-径流作用深度; 另一方面, 田坤等的试验是利用溴化钠饱和整个土层且填装土层厚度为 12 cm, 并且采用的是团聚体结构弱于黑土的黄绵土。

表3 不同近地表土壤水文条件下养分等效径流迁移深度/mm

Table 3 Effective transport depth of runoff under different soil surface hydraulic conditions

水文条件	NO <sub>3</sub> -N		NH <sub>4</sub> -N		PO <sub>4</sub> -P	
	无纱网覆盖	纱网覆盖	无纱网覆盖	纱网覆盖	无纱网覆盖	纱网覆盖
FD	2.43	1.71	1.10	0.81	0.47	0.27
Sa	12.99	14.00	2.23	1.83	0.93	0.99
SP	53.78	55.45	3.32	3.37	1.31	1.23

自由入渗条件下, 纱网覆盖消除雨滴打击后 NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 与 PO<sub>4</sub>-P 的 EDR 分别为 1.71、0.81 mm 和 0.27 mm, 较无纱网覆盖下分别减少 29.63%、26.36% 和 42.55%。这主要是因为雨滴打击能穿透径流层, 影响养分的解吸和释放。土壤水分饱和与壤中流条件下, 3 种养分的 EDR 在消除雨滴打击后基本无变化。可见, 雨滴打击对降雨-径流-土壤的作用深度的影响与水文条件有关。随着径流深度的增加, 雨滴打击对降雨-径流-土壤的作用深度的影响减弱。

### 3 讨论与结论

养分随径流泥沙迁移是一个复杂的过程, 受诸多因素的影响。目前的研究主要集中于降雨特性(雨强、雨型等)、地形(坡度、坡长等)、植被覆盖度和不同土地利用类型<sup>[25-28]</sup>等。降雨是土壤化学物质的溶剂和载



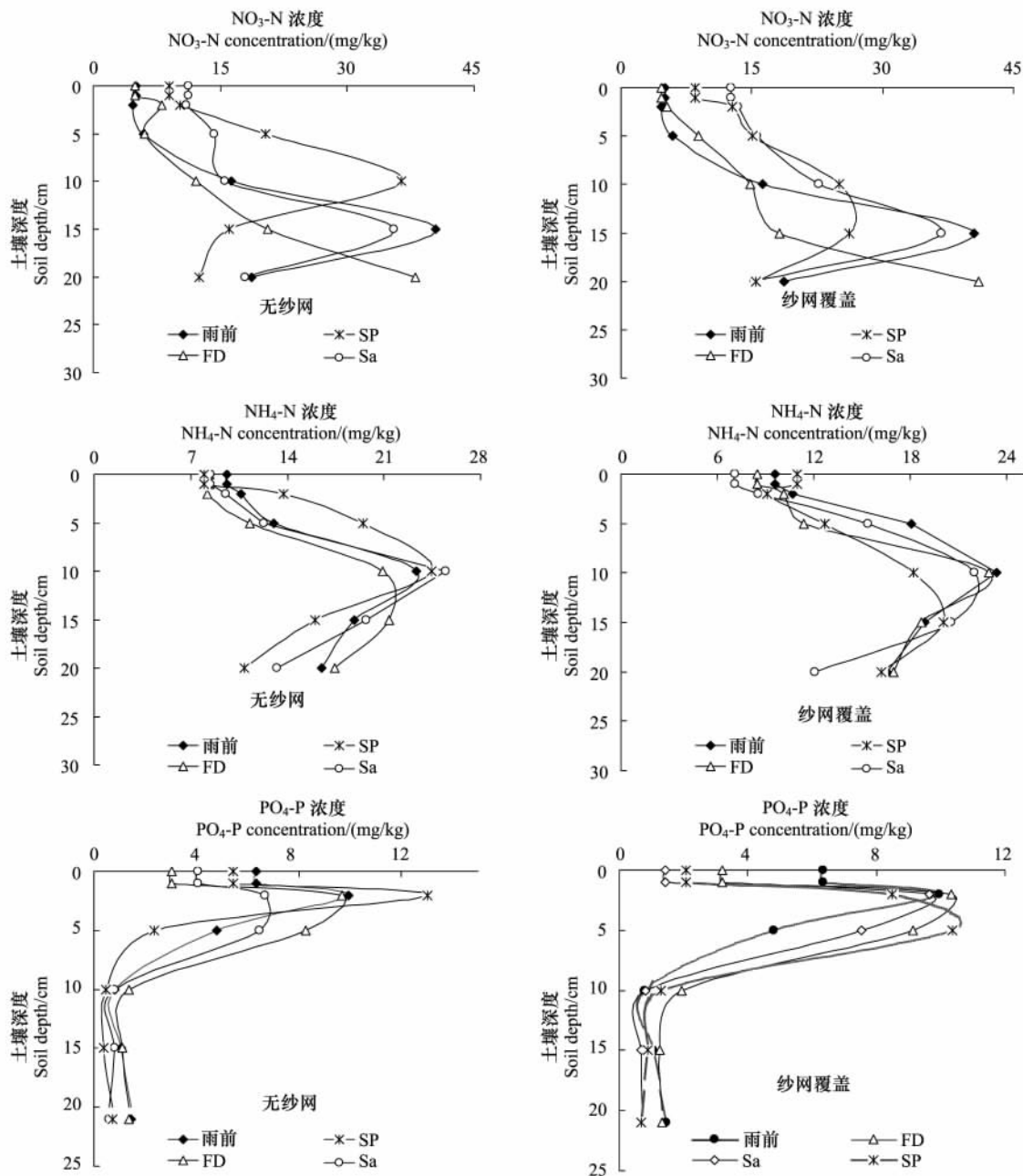


图5 不同近地表土壤水文条件下养分在土壤剖面中的分布

Fig.5 Distribution of nutrient concentrations in soil profile under different soil surface hydraulic conditions

体, 还是土壤养分流失的动力。雨滴打击对土壤侵蚀具有重大贡献, 因此也是影响养分迁移的重要因子之一。本文设计3种水文条件下, 对比分析雨滴打击对黑土坡面侵蚀过程及NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N与PO<sub>4</sub>-P随径流和侵蚀泥沙迁移的影响。

### 3.1 雨滴打击对土壤侵蚀过程的影响

消除雨滴打击后, 土壤侵蚀量减少59.4%—71.6%。不同水文条件下, 雨滴打击对侵蚀的影响不同。一方面可能是雨滴打击对土壤颗粒的分散力不同; 另一方面可能与结皮的形成有关。高斌<sup>[29]</sup>等认为对某一土壤类型一定水分含量内, 雨滴打击对土壤颗粒的分散在一定径流深度内是恒定的, 当超过了临界水深后分散能力随着水深的增加而降低。Ghadiri和Payne<sup>[30]</sup>认为当径流深度小于一个雨滴直径时, 雨滴打击对土壤颗

粒的分散能力达到最大。本试验中,色斑法测定 60 mm/h 下的雨滴直径为 1.83 mm。利用公式(4) 计算得出,自由入渗条件下,无纱网与纱网覆盖下径流深分别为 0.8 mm 和 0.7 mm;土壤水分饱和与壤中流条件下,无纱网与纱网覆盖下的径流深均为 0.9 mm。可见 3 种水文条件下,径流深均小于一个雨滴直径,说明雨滴打击对土壤颗粒的分散未受到限制。土壤水分饱和与壤中流的条件下,颗粒之间的粘结力降低且土壤抗剪强度下降,因此土壤颗粒更容易被分散,且分散的颗粒易阻塞毛孔,从而土壤表面极易形成致密的封闭层。试验结束后,明显观测到土壤表面致密层的存在。无纱网与纱网覆盖之间,径流泥沙浓度随降雨时间变化趋势的差异进一步表明雨滴打击对侵蚀过程的影响随水文条件改变而变化。

### 3.2 雨滴打击对养分流失的影响

降雨条件下土壤养分的迁移有两个过程:一是土壤养分随下渗水分向深层迁移;二是地表径流产生时,土壤表层的养分在雨滴打击及径流冲刷作用下,随地表径流和侵蚀泥沙进行迁移。许多学者认为耕作措施(免耕、增加地表覆盖等)能减少养分随径流和侵蚀泥沙的流失<sup>[31-32]</sup>。Sharpley<sup>[33]</sup>认为覆盖能减少  $\text{NO}_3\text{-N}$  的流失,但不能减少  $\text{NH}_4\text{-N}$  的流失。本文的研究表明,消除雨滴打击后,养分随径流和泥沙的流失均减少,但随泥沙流失的减少效应更为明显。雨滴打击对养分随径流的影响只在自由入渗条件下体现明显,土壤水分饱和与壤中流条件下几乎无影响,可能主要是由于:1)  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  主要随径流流失,随径流流失占到总流失量的 78% 以上(图 3—图 4),而消除雨滴打击后削减径流作用不明显;2) 流失的养分可能主要来自肥料,从而掩盖了雨滴打击对养分的作用。消除雨滴打击后,土壤侵蚀量明显减少,因此相应的减少了养分随泥沙的流失,但减少效应与水文条件和养分形式有关。养分的富集与颗粒的粒级有关<sup>[34]</sup>,因此侵蚀泥沙的颗粒分布差异可能是造成不同水文条件下雨滴打击对养分随泥沙流失影响不同的原因,但仍需要进一步的研究。薄层黑土胶体矿物组成以水云母类和蒙脱石为主<sup>[35]</sup>,同晶置换现象普遍,  $\text{NH}_4\text{-N}$  与  $\text{PO}_4\text{-P}$  通过静电引力被束缚在粘土矿物表面。因此,雨滴打击对吸附性物质的影响要高于非吸附性物质。

雨滴打击对降雨-径流-土壤的作用深度与水文条件有关。自由入渗下,消除雨滴打击减少了养分的等效径流迁移深度,说明雨滴打击使土壤表层养分与径流混合,同时它对下层土壤养分起到扰动作用,加速了土壤养分的物理化学过程的进行。随着土壤水分的饱和,雨滴打击对养分流失的影响减弱,养分的 EDR 无明显变化。造成这种现象的原因:1) 土壤水分饱和与壤中流条件下,养分在土壤表层富集,浓度达到最高;2) 消除雨滴打击后,养分流失无明显变化。虽然消除雨滴打击明显减少了养分随泥沙的流失,但养分随径流流失量占总流失量的 78% 以上;3) 流速无明显变化。利用公式(3) 计算得出土壤水分饱和条件下无纱网与纱网覆盖下的流速分别为 2.66 cm/s 和 2.62 cm/s,壤中流条件下相对应的流速分别为 2.73 cm/s 和 2.85 cm/s。由此得知消除雨滴打击后,坡面土壤与地表径流的作用时间并没有增加,从而并没有增加养分的解吸。

致谢: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提供试验场地;毕桂英和李秋芳老师对室内试验分析给予帮助,特此致谢。

### References:

- [ 1 ] Ellison W D. Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 1944, 25(4): 131-136.
- [ 2 ] Ellison W D. Soil Erosion Study-Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. *Agricultural Engineering*, 1947, 28(5): 197-201.
- [ 3 ] Ellison W D. Soil erosion study Part V: soil transport in the splash process. *Agricultural Engineering*, 1947, 28(8): 349-351, 353-353.
- [ 4 ] Dunne T, Zhang W H, Aubry B F. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resource Research*, 1991, 27(9): 2271-2285.
- [ 5 ] Meyer L D, Wischmeier H W. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1969, 12(6): 7754-7758.
- [ 6 ] Zheng F L. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of loess area. *China Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 95-101.
- [ 7 ] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(2): 312-321.
- [ 8 ] Gabbard D S, Huang C, Norton L D, Steinhardt G C. Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes. *Earth Surface*

- Processes and Landforms ,1998 ,23( 1) : 83-93.
- [ 9 ] Zheng F L , Huang C H , Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff. *Journal of Environmental Quality* ,2004 ,33( 6) : 2174-2182.
- [10] Baker J L , Lafflen J M. Water quality consequences of conservation tillage. *Soil and Water Conservation* ,1983 ,38( 3) : 186-193.
- [11] Jia H Y , Lei A L , Lei J S , Ye M , Zhao J Z. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil. *Agricultural Water Management* ,2007 ,89( 1/2) : 89-97.
- [12] Zhang X P , Liang A Z , Shen Y , Li W F , Zhang X L , Wang Y X , Xie Y J , Liu F F , Yang X M. Erosion characteristics of Black Soils in Northeast China. *Science Geographica Sinica* ,2006 ,26( 6) : 687-692.
- [13] Fan H M , Cai Q G , Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2004 ,18( 2) : 66-70.
- [14] Cui M , Cai Q G , Fan H M. Research progress on the soil erosion in black soil region of Northeast China. *Research of Soil and Water Conservation* ,2007 ,14( 5) : 28-32.
- [15] Zhou P H , Zhang X D , Tang K L. Rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall of the state key laboratory of soil erosion and dryland farming on Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation* ,2000 ,20( 4) : 27-30.
- [16] Zheng F L. A study on rainfall erosion and runoff erosion. *Bulletin of Soil and Water Conservation* ,1998 ,18( 6) : 17-21.
- [17] Guy B T , Dickinson W T , Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* ,1987 ,30( 5) : 1378-1387.
- [18] Zhang Y L , Zhang X C , Shao M A , Li S Q. Impact of straw cover on mineral nitrogen loss by runoff on loess slope. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2004 ,18( 1) : 85-88.
- [19] Galloway J N. Nitrogen mobilization in Asia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* ,2000 ,57( 1) : 1-12.
- [20] Wang Q J , Horton R , Shao M A. Effective raindrop kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff. *Soil Science* ,2002 ,167( 6) : 369-376.
- [21] Zhang Y L , Li H E , Zhang X C , Meng Q X. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* ,2007 ,23( 9) : 283-290.
- [22] Wang Q J , Shen B , Wang W Y. Experimental study of effects of rainfall energy on solute runoff process. *Water Resources and Water Engineering* ,1998 ,9( 1) : 17-21.
- [23] Zhang X C , Zhang Y L. Experimental Analyses on the Effective Depth of Interaction of Runoff with Soil Mineral Nitrogen on the Loess Slope. *Science Technology and Engineering* ,2005 ,5( 7) : 1256-1259.
- [24] Tian K , Huang C H , Zhang G J , Zheng F L. Chemical transfer from soil into surface runoff. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2009 ,23( 3) : 1-5.
- [25] Havis R N , Smith R E , Adrian D D. Partitioning solute transport between infiltration and overland flow under rainfall. *Water Resource Research* ,1992 ,28( 10) : 2569-2580.
- [26] Del Campillo M C , van Der Zee S E A T M , Torrent J. Modelling long-term Phosphorus leaching and changes in Phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. *European Journal of Soil Science* ,1999 ,50( 3) : 391-399.
- [27] Walton R S , Volker R E , Bristow K L , Smettem K R J. Solute transport by surface runoff from low-angle slopes: theory and application. *Hydrological Processes* ,2000 ,14( 6) : 1139-1159.
- [28] McDowell R W , Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during overland flow: Mahantango Creek catchment , Pennsylvania , USA. *Hydrological Processes* ,2002 ,16( 15) : 3037-3050.
- [29] Gao B , Walter M T , Steenhuis T S , Hogarth W L , Parlange J Y. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: theory and experiments. *Journal of Hydrology* ,2004 ,295( 1/4) : 291-304.
- [30] Ghadirri H , Payne D. Raindrop impact stress. *Journal of Soil Science* ,1981 ,32( 1) : 41-49.
- [31] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. *Soil Science Society of America Journal* ,1990 ,54( 2) : 312-321.
- [32] Soileau J M , Touchton J T , Hajek B F , Yoo K H. Sediment , nitrogen and phosphorous runoff with conventional and conservation-tillage cotton in a small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation* ,1994 ,49( 1) : 82-89.
- [33] Sharply A N , Smith S J , Naney J W. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* ,1987 ,35( 5) : 812-817.
- [34] Huang M X , Zhang S , Yan W J. Sediment enrichment mechanisms of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall conditions. *Acta Pedologica Sinica* ,2003 ,40( 2) : 306-310.

- [35] Qu J T, Zhuang J. Study of  $<2\mu\text{m}$  colloid surface electrochemistry characteristics of black soil and brown soil. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(2): 63-65.

#### 参考文献:

- [6] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. 土壤学报, 1998, 35(1): 95-101.
- [12] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 李文凤, 张学林, 王玉玺, 解运杰, 刘凤飞, 杨学明. 东北黑土水土流失特点. 地理科学, 2006, 26(6): 687-692.
- [13] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
- [14] 崔明, 蔡强国, 范昊明. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展. 水土保持研究, 2007, 14(5): 28-32.
- [15] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27-30.
- [16] 郑粉莉. 坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究. 水土保持通报, 1998, 18(6): 17-21.
- [18] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 李世清. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响. 水土保持学报, 2004, 18(1): 85-88.
- [21] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 孟庆香. 降雨—径流—土壤混合层深度研究进展. 农业工程学报, 2007, 23(9): 283-290.
- [22] 王全九, 沈冰, 王文焰. 降雨动能对溶质径流过程影响的实验研究. 西北水资源与水工程, 1998, 9(1): 17-21.
- [23] 张兴昌, 张亚丽. 径流与坡面土壤矿质氮素的作用深度研究. 科学技术与工程, 2005, 5(7): 1256-1259.
- [24] 田坤, Huang C H, 张广军, 郑粉莉. 土壤溶质迁移过程的试验研究. 水土保持学报, 2009, 23(3): 1-5.
- [34] 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理. 土壤学报, 2003, 40(2): 306-310.
- [35] 曲金潭, 庄杰. 黑土及棕壤 $<2\mu\text{m}$ 胶体表面电化学特性的研究. 土壤通报, 1997, 28(2): 63-65.