

# 近地表土壤水分条件对坡面农业非点源污染物运移的影响

张玉斌<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1\*</sup>, 曹宁<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 吉林大学植物科学学院, 长春 130062)

**摘要:** 采用人工模拟降雨实验, 研究了近地表土壤水分条件, 尤其是土壤水分饱和条件对土壤侵蚀过程中农业非点源污染物运移的影响。结果表明, 前期近地表土壤水分条件对土壤侵蚀过程中农业非点源污染物的迁移有着很大影响。饱和含水量时径流及泥沙中非点源污染物的流失浓度和流失量大于非饱和含水量, 且前期近地表土壤含水量越大, 径流及泥沙中农业非点源污染物的流失浓度和流失量越大。土壤氮素的主要流失途径是降雨所产生的径流, 约占总流失量的 90.4%~99.8%; 土壤磷素的流失途径是降雨径流和侵蚀产沙, 分别占总流失量的 2.67%~23.5% 和 76.5%~97.3%。同时, 土壤质地对磷素养分的流失有很大影响, 杨凌塬土随泥沙流失的 DP 浓度和流失量均大于安塞黄绵土。最后, 提出了采取最佳管理措施等控制农业非点源污染的针对性建议。

**关键词:** 近地表土壤水分条件; 农业非点源污染物运移; 人工模拟降雨; 径流过程; 泥沙

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0376-08

## Effects of Near-Surface Soil Water Conditions on Agricultural Non-point Source Pollutant Transport

ZHANG Yu-bin<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-Li<sup>1</sup>, CAO Ning<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Plant Science, Jilin University, Changchun 130062, China)

**Abstract:** Agricultural non-point source pollution is one of severe problems for water environment of agricultural area in China. The effects of near-surface soil water conditions on agricultural non-point source pollutant (AGNSP) transport during soil erosion processes, especially antecedent soil moisture was saturated, was developed by using artificial simulation rainfall experiment. The results showed that antecedent soil water content had great impact on AGNSP transport during soil erosive processes. Under the same soil texture, the AGNSP concentration and loading with runoff and sediment when the antecedent soil water content was saturated were greater than that of soil moisture unsaturated condition, and they would be increased as antecedent soil moisture increased. The approach of soil nitrogen loss was rainfall runoff; nitrogen loss with runoff was about 90.4% to 99.8% of total loss. The approaches of soil phosphorus were runoff and soil loss (sediment), the loss with runoff was about 2.67% to 23.5%, and the loss with sediment was about 76.5% to 97.3%. Soil texture had great influence on soil phosphorus loss; the concentration and loading of dissolved phosphorus (DP) with sediment from Yangling Loutu were greater than that of Ansai Loess. Some pertinence suggestions were given to control agricultural non-point source pollution, such as the best management practices.

**Key words:** near-surface soil water condition; agricultural non-point source pollutant (AGNSP) transport; artificial simulating rainfall; runoff process; sediment

土壤氮是地表水非点源污染(面源污染)的重要氮源, 土壤磷素的流失是水体富营养化的主要原因, 其迁移引发的环境问题已引起广泛的关注<sup>[1-4]</sup>。尤其是随着含 P 化肥和有机肥应用的不断增加, 农业系统的 P 素输入大于输出, 土壤 P 素的意义已超出农学意义, 其环境意义变得更为重要, 特别是在种植业和养殖业较为发达的地区, 由于长期过量施用 P 化肥和有机肥, 导致农田土壤耕层处于富 P 状态, 土壤 P 通过土壤侵蚀、地表径流、淋溶等途径向水体迁移, 引发接纳水体的富营养化<sup>[5]</sup>。农田土壤氮、磷随地表径流和侵蚀泥沙向水体迁移是农田氮、磷等农

业污染物损失的主要途径之一, 也是造成非点源污染的主要原因<sup>[6,7]</sup>。发达国家在 20 世纪 60 年代开始关注非点源污染的研究, 80 年代起进行系统研究, 并付诸管理实践。在我国起步相对较晚, 在早期阶段仅仅是对一些国外非点源模型的修正和简单应用, 20 世纪 80 年代中期以来, 在天津于桥流域、黄土高

收稿日期: 2008-02-22; 修订日期: 2008-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407201); 中国科学院西部行动计划(二期)项目(KZCX2-XB2-05-03); 国家科技支撑计划项目(2006BAD09B01)

作者简介: 张玉斌(1977~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土环境效应, E-mail: jnzhyb@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

原地区等地进行了地表径流氮磷流失研究<sup>[8,9]</sup>。90年代中期以来,注重于农田径流氮磷流失机制的研究<sup>[10,11]</sup>,多集中于定性和相关因素方面,如地表径流、土地利用结构、土壤类型与污染物在土体内的流失迁移及去除机制等<sup>[12~19]</sup>。

近年来,在研究控制农业非点源污染的同时,人们开始关注土壤水文条件与化学迁移之间的关系。研究发现,前期不同近地表土壤水分条件直接决定了降雨-入渗-农业污染物流失过程,通过对坡面的土壤侵蚀过程产生不同的影响,进而影响到农业非点源污染物的迁移过程;氮、磷等非点源污染的发生与强度很大程度上与水文循环有关系<sup>[20~22]</sup>。已有研究表明<sup>[6,23~28]</sup>,不同近地表土壤水文条件将对坡面的侵蚀过程产生不同的影响,进而影响到农业非点源污染物的迁移过程;特别是土壤水分饱和、壤中流的形成对农业非点源污染有重要贡献,流域下游接近河床的土壤水分饱和区是流域内养分流失的敏感区。因此,查明不同近地表土壤水分条件下可溶性无机氮、磷非点源污染物随径流和泥沙的迁移数量与规律,不仅对氮、磷非点源污染物流失估算有重要意义,且对农业非点源污染的防治也具有重要意义。

## 1 材料与方

### 1.1 试验装置与材料

本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,供试土壤为陕北安塞坡耕地黄绵土和杨凌农耕地塿土的表层土壤(0~20 cm)。试验采用的土槽为移动式变坡度钢槽,坡度变化范围为0°~25°,试验土槽长100 cm,宽50 cm,深45 cm(具体装置图请参见文献[29])。试验所采用的降雨机为中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式人工降雨机,降雨采用两组单喷头降雨机对喷,降雨高度为12 m,降雨强度范围为30~200 mm h<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

模拟试验设计坡面坡度为15°,设计降雨强度为50 mm h<sup>-1</sup>,但由于受模拟降雨系统管道水压力和喷头水压力的影响,实际降雨强度变化范围为48~59 mm h<sup>-1</sup>。对于安塞黄绵土设计4个水平的土壤含水量处理,分别是饱和土壤含水量(设定为100%)、土壤含水量占饱和土壤含水量的75%、50%和25%;对于杨凌塿土,设计3个水平的土壤含水量处理,分别是饱和土壤含水量、土壤含水量为饱和土壤含水量的50%和25%。每个处理重复3次。

根据安塞与杨凌当地施肥量在试验土槽表层0~2 cm施肥,肥料分别为KNO<sub>3</sub>(含氮13.9%)和K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>(含磷17.8%),土槽中陕北安塞坡耕地黄绵土的施肥量分别是43.3 g(以KNO<sub>3</sub>计)和16.8 g(以K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>计),杨凌农耕地塿土的施肥量分别是21.6 g(以KNO<sub>3</sub>计)和8.4 g(以K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>计)。具体试验处理如表1所示。

表1 试验设计<sup>1)</sup>

Table 1 List of experimental treatments

供试土壤及容重/g cm <sup>-3</sup>	土壤含水量(占饱和土壤含水量的百分比)/%	施肥量/kg hm <sup>-2</sup>
安塞黄绵土,1.27	100,75,50,25	120(以N计) 60(以P计)
杨凌塿土,1.30	100,50,25	60(以N计) 30(以P计)

1)设计雨强为50 mm h<sup>-1</sup>,坡度15°,重复3次

### 1.3 土壤饱和和含水量的测定

用环刀法<sup>[30]</sup>测定土壤饱和含水量,经测定安塞黄绵土的饱和含水量为33.9%,杨凌塿土的饱和含水量为46.7%。根据安塞黄绵土的土壤饱和含水量,可计算出占饱和含水量的75%、50%和25%含水量分别为25.5%、17.0%和8.5%。同样方法计算出占杨凌塿土饱和含水量的50%和25%含水量分别为23.4%和11.7%。

### 1.4 土壤水分含量的控制

试验自设计稳压供水装置,利用土壤毛管吸水原理,利用供水装置从试验土槽底部从下而上供给土壤剖面水分。试验土槽装土前先测定供试土槽中土壤含水量,根据所测定的土壤含水量及试验应控制的含水量,根据公式(1)计算出需要的供给水量。当控制土壤含水量为饱和含水量时,通过稳压供水装置,使供水水压与试验土槽的土壤表面高度相同,并利用土壤毛管吸水原理,从试验土槽的底部自下而上给土壤剖面供水。当试验土槽表面有充分的积水时,停止供水。当为其它控制土壤含水量时,自上而下利用喷水壶供给土壤剖面水分。

$$W_w = \frac{w_s \times 7 \times (1 - \alpha_2)}{(1 + \alpha_2/100) \times 100} \quad (1)$$

式中, $W_w$ 为所需补充水量(kg), $w_s$ 为每层填装土壤重(kg), $\alpha_1$ 为试验控制土壤水分含量(%), $\alpha_2$ 为测试土壤含水量(%)。

### 1.5 试验步骤

(1)供试土样的风干 将野外采集的土壤样品风干,过10 mm筛。

(2) 试验土槽装土 为保证良好的透水性,在试验土槽底部装 5 cm 细沙,在沙层之上装供试土壤.为保证装土的均匀性,试验土槽采用分层装土.具体是将沙层以上 35 cm 深的试验土槽按 5 cm 为 1 个土层,共分为 7 层.根据公式(2)计算各层所需的装土重量.试验土槽分层填土时,采用边填充边压实,保证试验设计的土壤容重.

$$W = \rho \times l \times w \times h \times (1 + \theta / 100) \quad (2)$$

式中,  $W$  为所需装土重量(kg),  $\rho$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $l$  为土槽长(cm),  $w$  为土槽宽(cm),  $h$  为土槽深(cm),  $\theta$  为土壤含水量(%).

一次降雨试验共准备 3 个装土的试验土槽,其中 1 个试验土槽供采集土壤水分样品使用,另外 2 个试验土槽供降雨试验使用.

(3) 降雨过程观测 降雨前进行降雨强度的率定,以确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求.在降雨过程中,记录产流时间,观测坡面土壤侵蚀过程;当坡面出现细沟侵蚀后,每隔一定时间量测细沟的长、宽、深变化,记录细沟侵蚀过程;并每隔一定时间,用数码相机拍摄记录坡面侵蚀过程.对于安塞黄绵土试验,降雨历时为 90 min;对于杨凌塬土试验,降雨历时为 60 min.

(4) 径流与泥沙采集 坡面产流后,用 5 L 塑料桶,对于安塞黄绵土每隔 3 min 采集次径流段的全部径流泥沙样,对于杨凌塬土每隔 5 min 采集次径流段的全部径流泥沙样.同时,在降雨过程中收集 100~200 mL 雨水,作为空白样品并进行测定.降雨完成后,将装置径流样的塑料桶称重后取径流上清液 100 mL,以供测试径流中养分含量;泥沙样品则放置于铝盒中在 55 °C 烘箱中烘干,烘干后所有泥沙样品进行混合并进行研磨.

## 1.6 非点源污染物的测定

分析测试项目:径流和泥沙样品中的 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、可溶性 P(dissolved phosphorus, DP).

样品分析:降雨结束后,将径流水样进行过滤置清处理,测定养分含量.烘干后的泥沙样品研磨过 1 mm 筛,取样品 10 g,以蒸馏水为浸提液,按水土比 10:1(水:土=10:1,质量比)振荡 30 min 后,用高速离心机离心 10 min(9 000 r/min),然后过滤取上清液测定养分含量. $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 用流动分析仪测定,DP 用钼蓝比色法测定<sup>[30]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 径流过程中农业污染物运移过程

由表 2 知,前期近地表土壤水分条件为饱和含水量时土壤 N、P 养分的流失浓度大于非饱和时含水量时的养分流失浓度;且径流中养分流失浓度随前期近地表土壤含水量的增加而增大的总体变化趋势.非饱和含水量时,土壤氮素流失浓度大于磷素流失浓度;而当土壤水分饱和时则土壤氮素的流失浓度小于 DP 的流失浓度.泥沙中养分流失浓度普遍大于径流中养分流失浓度.

在  $50 \text{ mm h}^{-1}$  降雨强度下,对于黄绵土,饱和含水量时径流中 $\text{NO}_3^-$ -N 的流失浓度是占饱和含水量 25%、50%和 75%时的 1.7、1.6 和 1.5 倍;径流中 $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度是占饱和含水量 25%、50%和 75%时的 3.5、1.4 和 1.4 倍;饱和含水量时径流中 DP 的流失浓度分别是占饱和含水量 25%、50%和 75%时的 69、276 和 460 倍.对于塬土,饱和含水量时径流中 $\text{NO}_3^-$ -N 的流失浓度是占饱和含水量 25%和 50%时的 1.2 和 1.0 倍;径流中 $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度是占饱和含水量 25%和 50%时的 1.5 倍;饱和含水量时径流中 DP 的流失浓度是占饱和含水量 25%和 50%时的 6.8 和 2.0 倍.

如图 1 所示, $50 \text{ mm h}^{-1}$  降雨强度下,对于黄绵土,产流过程中,随降雨历时的增长,径流中 $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度呈降低趋势.径流中 $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度呈波

表 2 不同近地表土壤水分条件下径流中氮、磷平均流失浓度<sup>1)</sup>

Table 2 Means of nutrient concentration with runoff under different near-surface soil moisture conditions

土壤类型	土壤水分含量(占饱和含水量的百分比)/%	径流/ $\text{mg kg}^{-1}$			泥沙/ $\text{mg kg}^{-1}$		
		$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	DP	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	DP
黄绵土(90 min)	25	7.3	0.2	0.2	10.9	6.8	1.4
	50	7.4	0.5	0.05	17.8	7.5	3.0
	75	7.8	0.5	0.03	22.7	7.9	10.0
	饱和含水量	12.2	0.7	13.8	25.1	9.7	16.7
塬土(60 min)	25	4.4	0.2	1.8	0.7	0.3	55.9
	50	5.3	0.2	6.2	1.4	0.3	56.1
	饱和含水量	5.4	0.3	12.4	1.9	0.3	77.0

1) 降雨强度为  $50 \text{ mm h}^{-1}$ ,下同

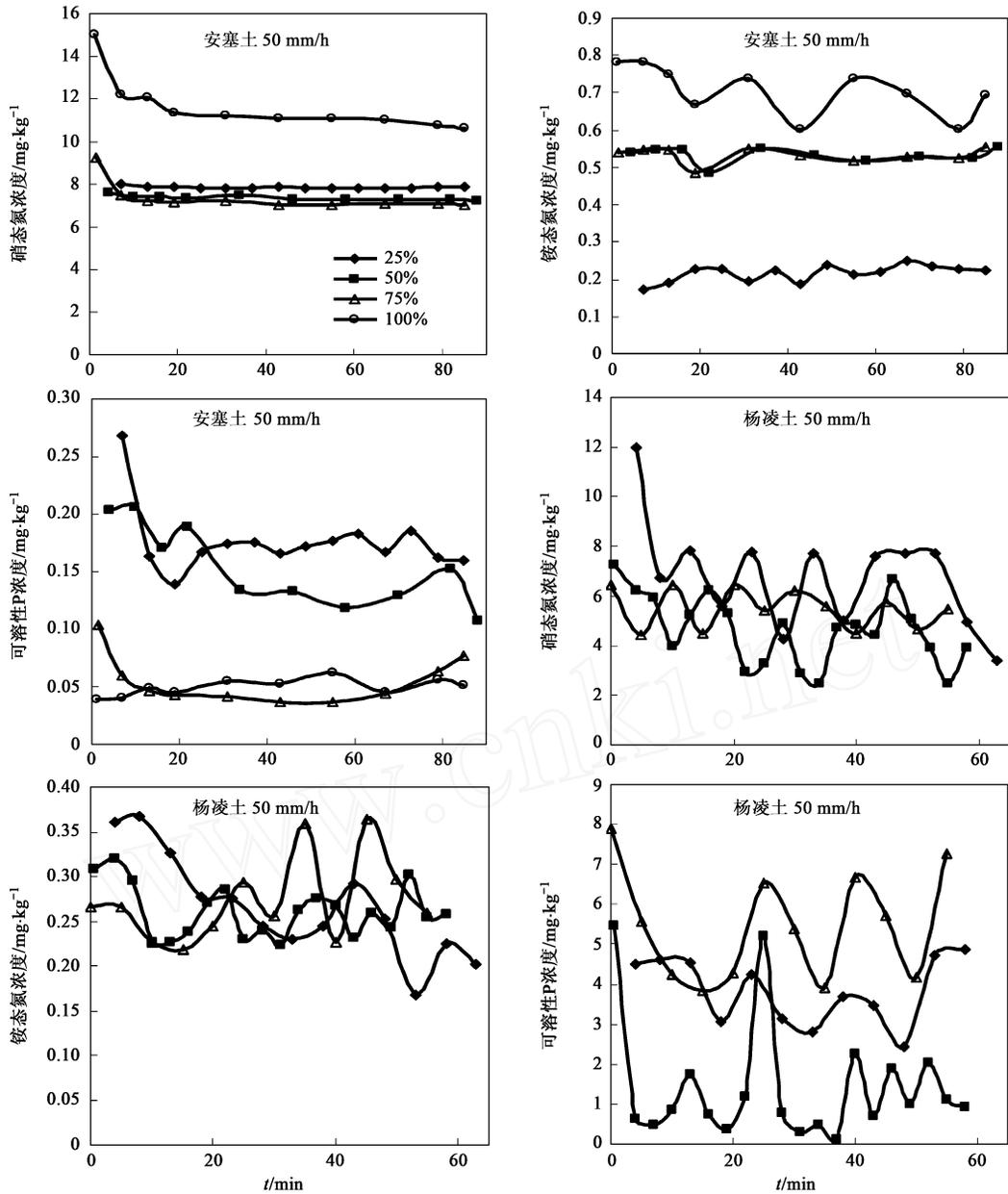


图 1 不同近地表土壤水分条件下径流中养分运移过程

Fig. 1 Nutrient loading process with runoff under different near-surface soil water conditions

状变化,其变化幅度不大.前期土壤含水量为饱和含水量的 25%时, $\text{NH}_4^+$ -N流失浓度呈平稳的波状渐增变化趋势;前期土壤含水量为饱和含水量的 50%和 75%时, $\text{NH}_4^+$ -N流失浓度基本上没有变化;土壤水分饱和时, $\text{NH}_4^+$ -N流失浓度呈渐低的波状变化.非饱和和土壤含水量条件下,降雨过程中 DP 的流失浓度随降雨历时的增长而减小,饱和含水量时径流中 DP 的流失浓度则呈渐增趋势.对于塬土,产流过程中, $\text{NO}_3^-$ -N的流失浓度在降雨过程中呈波状渐低变化. $\text{NH}_4^+$ -N的流失浓度且呈低高低波浪状起伏,出现较明显的“滞后效应”,前期土壤含水量为饱和含水量

时 $\text{NH}_4^+$ -N的流失浓度呈渐高趋势,而非饱和时则呈渐低趋势.降雨径流中可溶性 P 流失浓度呈高低高波状渐低变化趋势.

产流过程中,土壤养分呈现出波状变化趋势,可能与坡面径流的流速分布以及径流与土壤的作用强度有关.坡面水流由于水层较薄、受雨滴打击的影响较大,因而流态较为复杂.据鲁克新<sup>[31]</sup>研究,在陡坡条件下,坡面水流以滚波流的形式运动,并且滚波沿流程不断叠加,水深越大滚波叠加的数目越多.在滚波波峰叠加处水深的局部增加导致了径流侵蚀切力的剧增,径流与土壤的作用增大,土壤也相应地向径

流释放出更多的溶质;而滚波波谷叠加处的水深最浅,径流与土壤的作用强度也较小,养分含水量也较低.所以在产流过程中养分浓度的变化会出现峰谷相间的变化特征.

前期不同近地表土壤水分条件对产流过程中养分浓度的大小产生影响可能是由以下原因造成的:土壤中养分化合物有的以溶解态存在于土壤溶液中,有的以吸附态形式被吸附在土壤颗粒上,有的未溶解以固态形式存在于土壤中.同时,饱和含水量条件下径流中养分的流失量和浓度大于非饱和含水量时的养分流失量和浓度,是由于随着前期土壤水分的增加,土壤水对土壤颗粒或团聚体的浸泡作用增大,虽然如硝态氮等以溶解态存在于土壤溶液中的养分被稀释,浓度降低,但存在于团聚体中的养分则被解吸出来,增加了径流中流失养分的含量与数量;同时,以吸附态被吸附于土壤颗粒上养分也被土壤水浸提出来,使得径流中养分流失量增加.而且,随着径流泥沙的冲刷、携带作用的增大,下层土壤中的养分随径流泥沙的流失而流失.可以说,前期的补水过程与降雨-入渗过程补充了土壤水分,同时也改变了土壤溶液的浓度.这样一部分未溶解的固态养分可能溶解,一些养分以离子的形式可能从土壤颗粒上解吸,也可能在土壤颗粒表层发生交换反应.同时雨滴击溅作用在土壤养分向地表径流迁移过程中也起着至关重要的作用.一方面将表层土壤养分与雨水混合,若土壤表面积水,击溅作用将使土壤表层养分与表面积水及雨水混合,以供径流冲刷,起到搅拌作用.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;另一方面雨滴击溅作用增加了土壤侵蚀,使吸附在土壤颗粒上的养分随流失的土壤颗粒进入径流.此外,雨滴击溅作用改变了土壤表面特性,降低土壤入渗能力,使混合层土壤养分随径流迁移的几率增加.与此同时,径流冲

刷是土壤养分损失的另一重要因素.它不但将土壤表层的溶解养分带走,而且加剧了土壤侵蚀,吸附于土壤颗粒上的养分随着侵蚀泥沙的迁移而流失,间接增加了土壤养分的流失;由于径流冲刷使表土流失,使下层土壤养分直接受到雨滴和径流作用,加剧了下层养分向地表径流的迁移.可以说径流冲刷是灌溉(或补水)条件下土壤养分随地表径流迁移的主要因素.坡面水流在雨滴扰动和径流紊动作用下,加速了下层土壤养分向径流的传递过程,溶质紊动扩散作用远大于分子扩散作用.可以说土壤的入渗能力对养分流失的影响比较大,入渗能力大则表层土壤所含有的溶质数量减少,径流强度大则土壤养分随地表径流迁移数量多.

## 2.2 径流过程中农业污染物流失量分析

如表3所示,当前期近地表土壤水分饱和时径流中N、P养分的流失量大于非饱和含水量时养分的流失量,且径流中农业污染物的流失量总体上呈随前期近地表土壤水分的增加而增大的变化趋势.在50 mm/h降雨强度下,非饱和土壤水分条件时,径流中 $\text{NO}_3^-$ -N的流失量大于 $\text{NH}_4^+$ -N和DP的流失量.饱和含水量时,瘠土和黄绵土 $\text{NO}_3^-$ -N流失量小于DP流失量.

在50 mm h<sup>-1</sup>降雨强度下,对于黄绵土,饱和含水量时径流中 $\text{NO}_3^-$ -N的流失量是占饱和含水量25%、50%和75%时的3.0、2.9和1.8倍;径流中 $\text{NH}_4^+$ -N的流失量是占饱和含水量25%、50%和75%时的9.1、6.1和1.5倍;径流中DP的流失量是占饱和含水量25%、50%和75%时的254.2、57.5和57.5倍.对于瘠土,饱和含水量时径流中 $\text{NO}_3^-$ -N的流失量是占饱和含水量25%和50%时的1.5和1.2倍;径流中 $\text{NH}_4^+$ -N的流失量是占饱和含水量25%和50%时的1.1和1.0倍;径流中DP的流失量是占饱和含水量25%和50%时的8.4和2.2倍.

表3 不同近地表土壤水分条件下径流、泥沙中氮、磷流失量

Table 3 Means of nitrogen and phosphorus losses with runoff under different near-surface soil water conditions

土壤类型	土壤水分含量(占饱和含水量的百分比)/%	径流/mg kg <sup>-1</sup>			泥沙/mg kg <sup>-1</sup>		
		$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	DP	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	DP
黄绵土(90 min)	25	204.3	4.2	3.3	1.4	0.3	0.5
	50	207.1	6.3	14.6	1.7	0.9	0.4
	75	346.6	25.7	14.6	14.2	12.4	2.1
	饱和含水量	615.7	38.4	839.0	51.5	17.8	24.3
瘠土(60 min)	25	158.4	7.8	51.4	0.3	0.1	15.8
	50	204.5	8.7	199.5	0.4	0.1	17.4
	饱和含水量	239.9	8.8	433.5	0.6	0.6	89.5

### 2.3 侵蚀产沙过程中农业污染物的流失浓度和流失量

大多数径流的发生伴随着侵蚀泥沙对农业污染物的迁移,泥沙中氮磷流失量与产沙率具有一定的相关关系.随泥沙迁移的土壤养分主要以吸附在土壤颗粒上的溶质为主.

由表 2 可知,饱和含水量时泥沙中养分的流失浓度大于非饱和含水量条件时随泥沙流失的养分浓度,且随着前期近地表土壤含水量的增加,随泥沙流失的 NP 养分浓度增大.对于安塞黄绵土,随泥沙流失的养分中 N 素养分的流失浓度,特别是  $\text{NO}_3^-$ -N 的流失浓度大于 DP 的流失浓度;饱和含水量时的泥沙中  $\text{NO}_3^-$ -N 流失浓度分别是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失浓度的 2.3、1.4 和 1.1 倍;泥沙中  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度则是饱和含水量条件下分别是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失浓度的 1.4、1.3 和 1.2 倍;泥沙中 DP 的流失浓度则是饱和含水量条件下分别是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失浓度的 11.9、5.6 和 1.7 倍.而杨凌塬土的养分随泥沙流失的浓度则是 DP 的流失浓度大于 N 素的流失浓度;饱和含水量时的泥沙中  $\text{NO}_3^-$ -N 流失浓度分别是占饱和含水量 25%和 50%时流失浓度的 2.7 和 1.4 倍;泥沙中  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度则是饱和含水量条件时与非饱和含水量条件下的流失浓度大小一样;泥沙中 DP 的流失浓度则是饱和含水量条件下分别是占饱和含水量 25%和 50%时流失浓度的 1.38 和 1.37 倍,非饱和含水量条件下随泥沙流失的 DP 浓度几乎一样,可以说当前期近地表土壤水分含量为非饱和含水量时对随泥沙流失的 DP 浓度几乎没有影响.

表 3 则表明,饱和含水量条件下侵蚀泥沙中养分的流失量大于非饱和土壤水分条件时,总体上泥沙中养分流失量随前期近地表土壤含水量的增加而增大.泥沙中黄绵土的氮素流失量大于塬土的氮素流失量;泥沙中 DP 的流失量则塬土大于黄绵土.在  $50 \text{ mm h}^{-1}$  降雨强度下,对于黄绵土,饱和含水量时泥沙中  $\text{NO}_3^-$ -N 的流失量是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失量的 36.8、30.3 和 3.6 倍;饱和含水量时泥沙中  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失量的 59.3、19.8 和 1.4 倍;饱和含水量时泥沙中 DP 的流失量是占饱和含水量 25%、50%和 75%时流失量的 48.6、60.8 和 11.6 倍.

对于塬土,泥沙中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量变

化幅度较小,泥沙中 DP 流失量的变化幅度较大,且土壤氮素流失量小于磷素流失量.泥沙中  $\text{NO}_3^-$ -N 的流失量变化范围为 0.3 ~ 0.6,饱和含水量时  $\text{NO}_3^-$ -N 的流失量是占饱和含水量 25%和 50%时流失量的 2.0 和 1.5 倍;  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量变化范围为 0.1 ~ 0.6,饱和含水量时  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量是占饱和含水量 25%和 50%时流失量的 6.0 和 6.0 倍.饱和含水量时,泥沙中 DP 的流失量是占饱和含水量 25%和 50%时的流失量的 5.7 和 5.1 倍.

由以上分析可知,土壤氮素 ( $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N) 的流失中径流氮素流失量较随泥沙流失的氮素流失量大,说明土壤氮素的主要流失途径是降雨所产生的径流,侵蚀产沙所携带的氮素含量不大.虽然径流中 DP 的流失量也大于泥沙中 DP 的流失量,但泥沙中 DP 的流失量占有一定比例,所以,土壤磷素的流失途径是降雨径流和侵蚀产沙.产流过程中安塞黄绵土的非点源 N 素污染物流失浓度和流失量均大于杨凌塬土,这与黄绵土的施肥量大于塬土的施肥量有极大的关系,与塬土的孔隙度 (50%) 小于黄绵土的孔隙度 (50% ~ 60%) 也存在一定关系,孔隙度大则土壤溶液的数量较多,施肥后表层土壤中硝态氮含量则越高,随土壤侵蚀所流失的  $\text{NO}_3^-$ -N 数量越多,而  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失则可能与塬土的 CEC 含量 ( $10 \sim 20 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) 大于黄绵土的 CEC 含量 ( $5 \sim 10 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) 有关<sup>[32]</sup>.而在侵蚀泥沙中则塬土 DP 的流失量和流失浓度大于黄绵土 DP 在径流和泥沙中的流失量和浓度.这可能与塬土的  $\text{CaCO}_3$  含量 (7% ~ 10%) 小于黄绵土的  $\text{CaCO}_3$  含量 (9% ~ 14%) 有关<sup>[32]</sup>,由于  $\text{CaCO}_3$  对磷的固定作用非常显著,  $\text{CaCO}_3$  含量越多,对磷素的固定作用越大,降雨过程中土壤磷素随地表径流所流失的数量越少.

前期近地表土壤水分饱和时,土壤中 NP 养分的流失浓度和流失量均大于非饱和含水量条件下养分的流失浓度和流失量.而且,随着前期近地表土壤含水量的增加,侵蚀产流产沙过程中土壤 NP 养分,特别是黄绵土 NP 养分,其流失浓度和流量均随之增大.

### 3 结论

(1)  $50 \text{ mm h}^{-1}$  降雨强度下,对于黄绵土,产流过程中,随降雨历时的增长,径流中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度呈降低趋势.径流中  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度呈波状变化,其变化幅度不大.占饱和含水量的 25%时,  $\text{NH}_4^+$ -N 流失

浓度呈平稳的波状渐增变化趋势;占饱和含水量的 50%和 75%时,  $\text{NH}_4^+$ -N 流失浓度基本上没有变化;土壤水分饱和时,  $\text{NH}_4^+$ -N 流失浓度呈渐低的波状变化. 非饱和土壤含水量条件下, 降雨过程中可溶性 P 的流失浓度随降雨历时的增长而减小, 饱和含水量时径流中 DP 的流失浓度则呈渐增趋势. 对于瘠土, 产流过程中,  $\text{NO}_3^-$ -N 的流失浓度在降雨过程中呈波状渐低变化.  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度且呈低高低波浪状起伏;前期土壤含水量为饱和含水量时  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失浓度呈渐高趋势, 而非饱和时则呈渐低趋势. 降雨径流中可溶性 P 流失浓度呈高低高波状渐低变化趋势.

(2) 前期近地表土壤水分条件对土壤侵蚀过程中农业非点源污染物的迁移有着很大影响. 前期近地表土壤含水量越大, 径流和泥沙中农业非点源污染物的流失浓度和流失量越大, 总体上径流和泥沙中养分流失浓度和流失量随前期近地表土壤含水量的增加而增大;特别是当前期近地表土壤含水量为饱和含水量时, 径流和泥沙中非点源污染物的流失浓度和流失量大于非饱和含水量. 同时, 土壤氮素的主要流失途径是降雨所产生的径流, 土壤磷素的流失途径是降雨径流和侵蚀产沙, 但以径流为主要流失途径.

(3) 因此, 在北方雨季前期较干旱的气候下, 流域养分物质循环过程缓慢, 导致养分高累积性等情况下, 控制降雨过程中土壤水分饱和的形成, 特别是对污染源区的土壤水分的控制, 如增强入渗、减缓土壤水分饱和速率、多次少量施肥减少养分累积等措施, 是减少或防止农业非点源污染的关键所在. 由此可见, 采取“最佳管理措施 (best management practices, BMPs)”, 通过坡耕地改造、生物缓冲带建设等工程和生物措施, 特别是结合 2008 年全国首次污染源普查工作的开展, 优先控制源区、重点控制农田水土流失、广泛控制农田污染的源区治理模式, 减少或控制降雨径流泥沙的产生, 是可能消减并防止非点源污染发生的可控模式.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Novotny V, Chesters G. Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981. 81-103.
- [ 2 ] Sharpley A. Minimizing Agricultural Nonpoint-Source Impacts: A Symposium Overview [J]. J Environ Qual, 1994, 23: 1-3.
- [ 3 ] 朱建国, 郭红岩, 王晓蓉. 非点源污染研究及其控制对策 [A]. 见: 中国土壤学会. 中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会文集: 面向农业与环境的土壤科学 (综述篇) [C]. 北京: 科学出版社, 2004. 336-353.
- [ 4 ] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策: , , [J]. 中国农业科学, 2004, 37 (7): 1008-1033.
- [ 5 ] Sharpley A, Foy B, Withers P. Practical and Innovative Measures for the Control of Agricultural Phosphorus Losses to Water: An Overview [J]. J Environ Qual, 2000, 29: 1-9.
- [ 6 ] Zheng FL, Huang C, Norton L D. Effects of Near-Surface Hydraulic Gradients on Nitrate and Phosphorus Losses in Surface Runoff [J]. J Environ Qual, 2004, 33 (6): 2174-2182.
- [ 7 ] 张玉斌, 郑粉莉, 武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染国外研究进展 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (1): 123-132.
- [ 8 ] 朱萱, 鲁纪行, 边金钟, 等. 农田径流非点源污染特征及负荷定量方法探讨 [J]. 环境科学, 1985, 6 (5): 6-11.
- [ 9 ] 郭伦, 李佩武. 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究 [J]. 环境科学学报, 1996, 16 (1): 111-116.
- [ 10 ] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2001, 21 (1): 7-12.
- [ 11 ] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理 [J]. 地理学报, 2003, 58 (1): 147-153.
- [ 12 ] 窦培廉, 王晓燕, 王丽华. 非点源污染中氮磷迁移转化机理研究进展 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2006, 27 (2): 93-98.
- [ 13 ] Vadas P A, Kleinman P J A, Sharpley A N. A Simple Method to Predict Dissolved Phosphorus in Runoff from Surface-Applied Manures [J]. J Environ Qual, 2004, 33: 749-756.
- [ 14 ] Allen B L, Mallarino A P, Klatt J G, et al. Soil and Surface Runoff Phosphorus Relationships for Five Typical USA Midwest Soils [J]. J Environ Qual, 2006, 35: 599-610.
- [ 15 ] 梁秀娟, 肖长来, 杨天行, 等. 密云水库中氮分布及迁移影响因素研究 [J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35 (增刊 1): 272-280.
- [ 16 ] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区氮的污染源和反硝化 [J]. 中国科学 B 辑, 2001, 31 (2): 131-137.
- [ 17 ] 单保庆, 尹澄清. 小流域磷污染非点源输出的人工降雨模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2000, 20 (1): 33-37.
- [ 18 ] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制 [J]. 环境科学, 2000, 21 (2): 98-100.
- [ 19 ] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例 [J]. 第四纪研究, 2003, 23 (3): 262-269.
- [ 20 ] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls phosphorus loss from upland agricultural watersheds [J]. J Environ Qual, 1998, 27 (2): 267-277.
- [ 21 ] Haygarth P M, Hepworth L, Jarvis S C. Form of phosphorus transfer and hydrological pathways from soil under grazed grassland [J]. Eur J Soil Sci, 1998, 49: 65-72.
- [ 22 ] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating Phosphorus Release from Soils to Surface Runoff and Subsurface Drainage [J]. J Environ Qual, 2001, 30: 508-520.
- [ 23 ] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural

- watershed: observations on the role of riparian forest [J]. *Ecology*, 1984, **65**: 1466-1477.
- [24] Baker J L, Laflen J M. Water quality consequences of conservation tillage[J]. *J Soil and Water Cons*, 1983, **38**(5-6): 186-193.
- [25] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls phosphorous loss from upland agricultural watersheds[J]. *J Environ Qual*, 1998, **27**(2): 267-277.
- [26] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, *et al.* Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[J]. *J Environ Qual*, 2000, **29**: 130-144.
- [27] Walter M T, Walter M F, Brooks E S, *et al.* Hierologically sensitive areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment [J]. *J Soil and Water Conservation*, 2000, **55**(3): 277-284.
- [28] Zheng F L, Huang C, Norton L D. How near-surface moisture gradients affect phosphorus and nitrate losses[A]. In: Ascough J C, Flanagan D C. *Soil Erosion Res. For the 21st Century*, Amr Proceedings of the International Symposium [C]. Soc Agri Eng, Hawaii, 2001. 649-652.
- [29] 张玉斌. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程和农业非点源污染物运移的影响[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2006. 27.
- [30] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 402-411.
- [31] 鲁克新. 陡坡薄层水流侵蚀动力过程试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001. 47-51.
- [32] 陕西省土壤普查办公室著. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 91-110, 185-204.

## 关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部