

# 黑土区坡耕地次降雨硝态氮径流及壤中流迁移研究

董文财<sup>1</sup>, 李林<sup>2</sup>, 付强<sup>1</sup>

(1.东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2.塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

**摘要:**为了研究黑土区坡耕地土壤养分硝态氮径流及壤中流迁移规律,开展了野外原位监测试验,揭示了玉米根系及犁底层影响下径流及壤中流驱动硝态氮迁移特征。结果表明:降雨特征对黑土区坡耕地地表径流影响显著,径流过程表现出多变的历程特点。不同降雨特征条件下,地表径流硝态氮迁移呈现相同的上升、下降及平缓 3 个阶段,约 4 min 上升段达到峰值开始下降,12 min 以后趋于平缓。黑土区坡耕地不同降雨特征条件下壤中流增长及消退变化历程一致,快速增长阶段历时约 6 min,累积出流量 9.0 ml/m,快速消退阶段历时约 14 min,累积出流量 21.2 ml/m,中间稳定阶段壤中流径流强度为 6 ml/(min·m)。壤中流稳定阶段硝态氮迁移强度约为 0.09 mg/(min·m),上升及消退阶段累积迁移量平均为 0.20、0.25 mg/m。上升、消退段壤中流流量(硝态氮)之和加壤中流历时与壤中流(硝态氮)峰值强度乘积,可得到壤中流(硝态氮)出流总量,两次计算与实测壤中流流量(硝态氮)误差为 0.7、2.4%(1.2、11.8%),精度较高,说明计算方法可行。上升、消退段壤中流流量(硝态氮)之和加壤中流历时与壤中流(硝态氮)峰值强度乘积,可得到壤中流(硝态氮)出流总量,两次计算与实测壤中流流量(硝态氮)误差为 0.7、2.4%(1.2、11.8%),精度较高,说明计算方法可行。

**关键词:**黑土区; 坡耕地; 径流; 壤中流; 硝态氮

**中图分类号:**S152.7; TV121<sup>+</sup>.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)02-0001-06

## Study on Migration of Nitrate-Nitrogen in Runoff and Interflow During Rainfall Event in Black Soil Area

DONG Wencai<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2.College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

**Abstract:** In order to study migration of soil nitrate nitrogen in runoff and interflow in sloping farmland in black soil area, field in-situ monitoring experiments were carried out to reveal the characteristics of nitrate nitrogen migration driven by runoff and interflow under the influence of maize root system and plough pan. The results show that the rainfall characteristics have a significant effect on the surface runoff of sloping farmland in black soil area, and the runoff process shows a variable course; under different rainfall conditions, the nitrate nitrogen migration in surface runoff presented the same three stages of rise, fall and gentleness; the rise stage reached its peak after about 4 minutes and began to decline, and it tended to be gentle after 12 minutes; under different rainfall characteristics of sloping farmland in the black soil area, the growth and regression processes of interflow were the same; the rapid growth stage lasted about 6 minutes, with the cumulative flow rate of 9.0 ml/m, and the rapid regression stage lasted about 14 minutes, with the cumulative flow rate of 21.2 ml/m; in the intermediate stable stage, the runoff intensity of interflow was 6 ml/(min·m), the nitrate migration intensity was about 0.09 mg/(min·m) in the stable stage of soil flow, and the average cumulative migration was 0.20 mg/m and 0.25 mg/m in the rising and subsiding stages; the total interflow (nitrate) was equal to the sum of the flows in the rise and fall sections plus the product of interflow duration and the peak of interflow (nitrate). The errors between the two calculated and the measured interflow (nitrate) were 0.7, 2.4% (1.2, 11.8%), with high accuracy, indicating that the calculation method was feasible.

**收稿日期:**2020-05-07

**修回日期:**2020-05-24

**资助项目:**国家自然科学基金重点项目(51439006);黑龙江省自然科学基金(E2018010)

**第一作者:**董文财(1980—),男,黑龙江安达人,副教授,主要从事农业水土工程、土壤物理研究。E-mail:wencai80923@163.com

**通信作者:**李林(1977—),男,四川内江人,副教授,主要从事水土资源系统分析及高效利用研究。E-mail:55014370@163.com

**Keywords:** black soil area; farmland; runoff; interflow; nitrate nitrogen

硝态氮的迁移运动是农业面源污染和水体富营养化的主要原因<sup>[1-5]</sup>,降雨过程中土壤入渗水及地表径流驱动土壤硝态氮垂直及水平迁移,同时,土壤硝态氮作为农作物主要肥料之一,其迁移运动直接影响作物产量<sup>[6]</sup>,针对土壤硝态氮迁移研究成为我国学者的重要课题。关于水分运动驱动硝态氮迁移研究,众多学者基于不同影响条件进行了深入探索。刘小刚等<sup>[7]</sup>研究了不同沟灌方式下玉米根区矿物氮素的迁移,得出固定隔沟灌溉的灌水沟内硝态氮含量小于非灌水沟,施氮后非灌水沟硝态氮保持较高水平。张长保等<sup>[8]</sup>研究了土壤初始含水量对黄土硝态氮迁移特征影响,指出初始含水量高,初始径流硝态氮含量相应较高。段然等<sup>[9]</sup>研究指出土壤氮素径流流失量低于 0.70 kg/hm<sup>2</sup>,而氮素淋失量却远高于此<sup>[10-11]</sup>。阮晓红等<sup>[12]</sup>研究了氮素在包气带不同土质层中饱水条件下迁移转化特征,建立了一维饱和土壤层中氮迁移的预测模型。王超<sup>[13]</sup>在分析氮转化机理的基础上,借助于土柱试验,探讨氨氮和硝态氮在非饱和土壤中的变化过程,并建立了描述氮迁移转化的数学模型。Li 等<sup>[14]</sup>运用试验与数值模拟相结合的方法研究了农田地表径流中硝态氮的淋失规律。前人对土壤硝态氮径流迁移研究取得了丰硕成果,对农田土壤养分管理具有重要意义。

黑土区坡耕地壤中流是坡地径流的重要组成部分

分,对养分迁移影响显著<sup>[15-17]</sup>,土壤硝态氮是径流迁移氮素的主要形态<sup>[18]</sup>。关于土壤硝态氮与径流关系的研究众多,但均未涉及犁底层,我国东北黑土区坡耕地耕作层逐年变薄,紧密的犁底层上移变厚,造成土壤透水、透气性差,严重影响水分入渗<sup>[19-21]</sup>,犁底层的存在为壤中流的形成创造了条件,使得黑土区坡耕地土壤硝态氮运移规律更加复杂,不能简单借鉴其他地区研究成果,为此,本文通过野外试验,获取黑土区玉米坡耕地降雨过程中土壤硝态氮随地表径流、壤中流迁移过程,揭示黑土区坡耕地土壤硝态氮径流、壤中流迁移规律,并提出壤中流及其驱动下土壤硝态氮计算模型,以期为我国黑土区坡耕地田间水分、养分管理提供科学依据。

## 1 试验区概况

试验区位于黑龙江省安达市昌德镇(北纬 46°7′18″,东经 124°59′25″),作物有效生长季为 120~130 d,生长季≥10℃的有效积温为 2 700℃以上,年平均降雨量 400 mm,降水集中,单次降雨强度大,历时较短。地面坡度 1/600。土壤类型为壤土,土壤基本农化状况见表 1。传统耕作模式下犁底层深(13±2) cm,犁底层土壤容重 1.38 g/cm<sup>3</sup>,犁底层以上土壤容重平均 1.23 g/cm<sup>3</sup>,犁底层以上附近土壤田间持水量 32.1%。主要农作物为玉米和大豆。

表 1 土壤基本农化状况

| 深度/cm | 各级颗粒含量/%  |               |          | 有机质/ | 全氮/                   | 全磷/                   | 碱解氮/                   | 速效磷/                   | 速效钾/                   | pH 值 |
|-------|-----------|---------------|----------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------|
|       | <0.002 mm | 0.002~0.05 mm | >0.05 mm | %    | (g·kg <sup>-1</sup> ) | (g·kg <sup>-1</sup> ) | (mg·kg <sup>-1</sup> ) | (mg·kg <sup>-1</sup> ) | (mg·kg <sup>-1</sup> ) |      |
| 0—20  |           |               |          | 1.52 | 1.34                  | 0.68                  | 83                     | 29.2                   | 123                    | 7.65 |
| 20—40 | 14.56     | 65.15         | 20.29    | 1.48 | 0.99                  | 0.62                  | 54                     | 25.0                   | 112                    | 7.67 |
| 40—60 |           |               |          | 1.39 | 0.78                  | 0.57                  | 53                     | 18.9                   | 118                    | 7.62 |

## 2 试验设计

试验地为长期耕作农田,地面坡度 5°。以玉米耕地为研究对象,试验设 2 个处理,各处理以 CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>表示,每个处理 3 个重复,为了避免土壤空间变异性对试验产生影响,各处理收集同一试验小区不同时间降雨径流及壤中流过程,设 1 个试验小区。传统耕作模式耕种,耕种后沿小区四周埋设 40 cm 深塑料隔水带,试验小区顺垄向长 4.0 m,宽 3.9 m,面积 15.6 m<sup>2</sup>,6 根垄 3 组重复,每两个垄沟为一个径流收集区域,试验装置及布置见图 1。玉米品种为罕玉 5 号,种植密度为 6.0 万株/hm<sup>2</sup>,耕作方式为垄作,垄宽 0.65 m,播种前基肥施尿素 115 kg/hm<sup>2</sup>,磷酸二铵 25 kg/hm<sup>2</sup>,硫酸钾 37.8 kg/hm<sup>2</sup>,田间管理同大田。

自 7 月 15 日开始,监测每一次降雨过程,抽取 2 次产生壤中流降雨过程分析。CK<sub>1</sub>壤中流产生日期为 8 月 2 日,平均降雨强度为 69.6 mm/h,降雨历时 39.2 min;CK<sub>2</sub>壤中流产生日期为 8 月 21 日,平均降雨强度为 89.4 mm/h,降雨历时 32.7 min。

土壤水分剖面取样,2 次试验分别在地表径流产生时刻及壤中流产生时刻利用遮雨棚将取样地遮盖后立刻取样,沿垂向取剖面,每 1.0 cm 取 1 个样品,取至 20 cm 深,土壤水分剖面取样位置位于径流取样小区之外,紧邻小区,处理同小区,以免破坏试验小区径流形成过程。采用烘干法测定土壤含水量,105℃恒温烘 12 h 以上至恒重。降雨过程中利用标准直径 20 cm 雨量器盛接降雨,每 3 min 取 1 个样品,倒入雨量筒,确定降雨强度。地表径流及壤中流产生时

间采用秒表测定,地面出现积水时刻既为地表径流产流时刻。壤中流产生时刻为集水器有水滴出现时刻。径流及壤中流收集装置见图 1。单个集水槽宽度为 1.3 m,壤中流集水槽高度为 10 cm,将集水槽下缘贴近犁底层面上边界打入土中(深 5 cm),防止收集到的水流漏失(图 1)。壤中流集水槽上缘与地面径流集水槽下缘贴紧,打入土壤中(自垄沟底向下 2 cm 位置),深入土壤长度为 20 cm,长于壤中流收集装置下缘打入土壤中长度,避免地面径流渗漏到壤中流集水槽中,影响试验精度。各集水槽打入土壤后出口略向下倾斜以保证快速流出。地表径流产生后每 1.0 min 收集一个水样,壤中流出现后每 1.0 min 收集一个水样。地表径流及壤中流过滤后采用紫外分光光度计测定硝态氮浓度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 地表径流及壤中流产流时刻土壤含水量特征

土壤表层入渗能力小于降雨强度,产生地表径流。犁底层入渗能力小于犁底层以上土壤入渗强度,

入渗水在犁底层以上积累,土壤含水量超过田间持水量,犁底层以上土壤水水平移动,产生壤中流。如图 2 所示,2 次降雨地表径流产流时刻  $CK_1$  为 19.4 min,  $CK_2$  为 10.7 min,表层土壤含水量均已饱和,  $CK_1$  湿润锋下移至 10 cm 深处,  $CK_2$  湿润锋在 9 cm 附近(图 2A—B),均未触及犁底层。  $CK_2$  降雨强度为 89.4 mm/h,显著高于  $CK_1$ ,两次降雨土壤初始含水量较为接近,  $CK_2$  产流时间较  $CK_1$  早 8.7 min,累积入渗量少 6.5 mm,土壤水分下移较  $CK_1$  浅。土壤含水量曲线较为连续光滑,反映出土壤质地较为均匀。

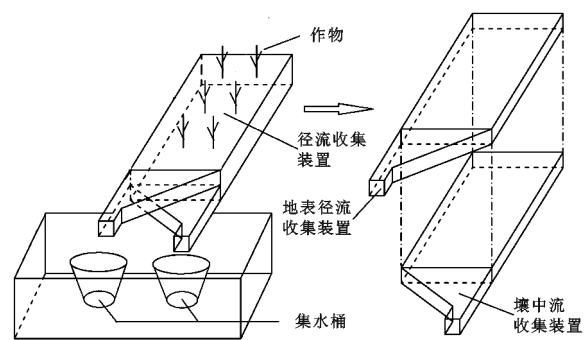


图 1 试验装置及布置示意图

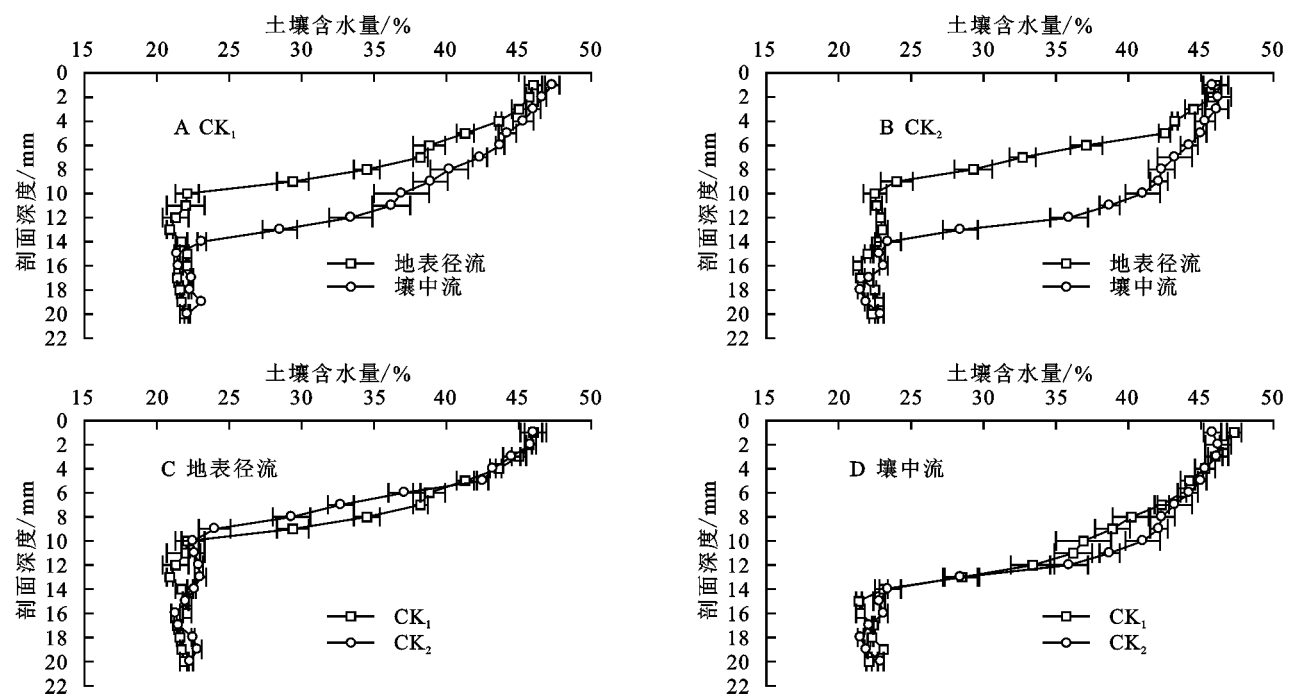


图 2 次降雨地表径流产流时刻及壤中流产流时刻剖面含水量变化

2 次试验壤中流产流时刻土壤含水量湿润锋均已达到 14 cm 附近,深入犁底层,犁底层以上土壤含水量分别为 33.1%, 35.2%,均超过了田间持水量(图 2A—B)。对比 2 次试验壤中流产流时刻与地表径流产流时刻土壤剖面含水量变化(图 2A—B),土壤湿润锋显著下移,  $CK_2$  剖面含水量变化量高于  $CK_1$ 。对比 2 次试验产流时刻剖面含水量变化(图 2C),  $CK_1$  较  $CK_2$  略下移,说明在土壤初始含水量相近

情况下,降雨强度小,产流时刻后移,产生地表径流前入渗到土壤中水量增加,湿润体狭长。2 次试验壤中流产流时刻土壤剖面含水量较为接近(图 2D),特别是湿润锋前沿基本重合,说明黑土区相同下垫面条件下壤中流产流时刻土壤剖面各层含水量基本固定,不受降雨强度及土壤初始含水量影响。证明了孔达等<sup>[21]</sup>相关研究提出的壤中流产生时刻剖面含水量图的准确性。

### 3.2 径流及壤中流特征

如图 3 所示,从降雨开始至地表径流产生时间分别为 19.4, 10.7 min。CK<sub>1</sub> 降雨强度较为均匀,同时出现了减小趋势,CK<sub>1</sub> 地表径流出现 10 min 左右流量趋于稳定。CK<sub>2</sub> 降雨强度大,较早超过表层土壤入渗能力,产生地表径流。由于 CK<sub>2</sub> 后期降雨强度有所增加,CK<sub>2</sub> 地表径流量变化经历了约 20 min 直至降雨结束仍然处于增长趋势。CK<sub>1</sub> 地表径流最大单位时间流量约 440 ml/min, CK<sub>2</sub> 为 2 390 ml/min,可见土壤初始含水量相近情况下,降雨强度对地表径流影响显著。2 次试验地表径流变化过程说明,地表径流特征主要受到降雨强度变化的影响。地表径流是伴随降雨过程产生的,降雨结束后,地表径流很快结束(图 3A—B)。

壤中流出现时刻分别约为 31, 27 min, CK<sub>1</sub> 明显滞后 CK<sub>2</sub>, 但壤中流产流时刻土壤剖面含水量几乎相同(图 2D), CK<sub>1</sub> 降雨强度小,土壤初始含水量低,要达到壤中流出流条件,需要经历更长的雨水渗入时间。2 次试验从壤中流出现经历快速增长阶段历时约 6 min, 壤中流增长过程较为一致, CK<sub>1</sub> 最大流量为 8.9 ml/min, CK<sub>2</sub> 为 7.8 ml/min(图 3), CK<sub>2</sub> 峰值较 CK<sub>1</sub> 低, CK<sub>2</sub> 发生日期较 CK<sub>1</sub> 晚 19 d, 土壤经历了进一步密实过程,减弱了壤中流出流能力,这可能是造成这一现象的主要原因。2 次试验峰值流量强度相对接近,表明壤中流产流遵循固定条件。曹程鹏等<sup>[22]</sup> 针对黑土区坡耕地通过模拟人工降雨试验测得裸土坡面坡度 7° 时壤中流峰值径流率为 3.75 ml/(min·m), 显著低于本研究试验结果[CK<sub>1</sub> 为 6.8 ml/(min·m), CK<sub>2</sub> 为 6.0 ml/(min·m)]。出现这一现象的原因,一方面是自然耕

地土壤导水能力空间变异性,存在优先流通道,另一方面是玉米根系的存在,增强了土壤横向导水能力,促进了壤中流的迁移。

降雨结束后壤中流流量开始衰减,历时约 14 min 停止出流。壤中流区别于地表径流之处在于其过程稳定性受降雨强度影响小,几乎不受降雨强度影响,存在稳定的快速上升及衰减过程(图 3)。壤中流上升阶段累积出流单宽流量分别为 8.2, 9.7 ml/m, 平均 9.0 ml/m; 消退阶段累积出流单宽流量分别为 20.6, 21.7 ml/m, 平均 21.2 ml/m。CK<sub>2</sub> 壤中流出现时刻早于 CK<sub>1</sub> 约 4 min, 二者增长趋势一致,说明 CK<sub>2</sub> 应该早于 CK<sub>1</sub> 约 4 min 出现峰值。图 3B 较图 3A 壤中流流量上升段距下降段远,说明 CK<sub>2</sub> 经历了壤中流稳定阶段,虽然 CK<sub>2</sub> 未能呈现较为宽广的平稳段,这可能由于试验过程中某些原因引起第 5, 6 个样品出现误差造成的。图 3B 峰值误差较大,也证实了这一情况。

结合孔达等<sup>[21]</sup> 提出的壤中流产生时刻确定方法,可计算黑土区坡耕地任意降雨壤中流出流量,计算方法为本文测得的上升与消退阶段流量之和加壤中流产流时刻至降雨结束历时与壤中流峰值强度乘积,即可得到任意降雨壤中流出流总量。利用此法分别计算本文试验 CK<sub>1</sub> 与 CK<sub>2</sub> 累积总量为 54.08, 62.66 ml, 与实测值误差分别为 0.7%, 2.4%, 精度较高,可见本文提出的壤中流径流计算方法是可行的。鉴于不同研究者提出的坡度对壤中流的影响<sup>[22-23]</sup>, 可建立不同坡度壤中流计算公式数据库,实现黑土区任意降雨壤中流出流量快速计算,避免壤中流物理模型的建立及求解复杂性。

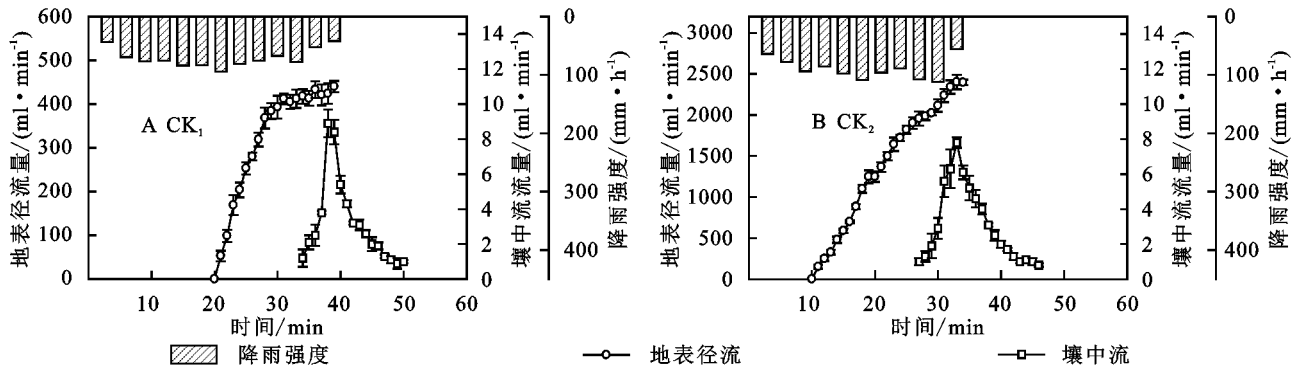


图 3 2 次试验地表径流及壤中流过程变化

### 3.3 地表径流及壤中流硝态氮迁移特征

对比径流及壤中流硝态氮迁移量, CK<sub>1</sub> 壤中流迁移量显著高于地表径流迁移量(图 4A), CK<sub>2</sub> 大部分时段壤中流迁移量高于地表径流迁移量(图 4B)。CK<sub>1</sub> 与 CK<sub>2</sub> 累积地表径流量分别为 6 300, 34 374 ml, 壤中流累积流量分别为 53.7, 61.2 ml, 分别相差 117, 526 倍, CK<sub>1</sub> 与 CK<sub>2</sub> 累积径流硝态氮迁移量分别为

0.24, 0.91 mg, 累积壤中流硝态氮迁移量分别为 0.84, 0.96 mg(图 4A—B)。随壤中流迁移的硝态氮累积量分别为地表径流迁移累积量的 3.5, 1.1 倍, 硝态氮壤中流迁移能力远高于地表径流(图 4), 说明壤中流迁移是土壤硝态氮水平运移的主要途径。地表径流虽然流量大, 但通过雨滴击溅和对流扩散作用从

表土进入地表径流的硝态氮较少,造成地表径流硝态

氮含量远低于壤中流硝态氮含量。

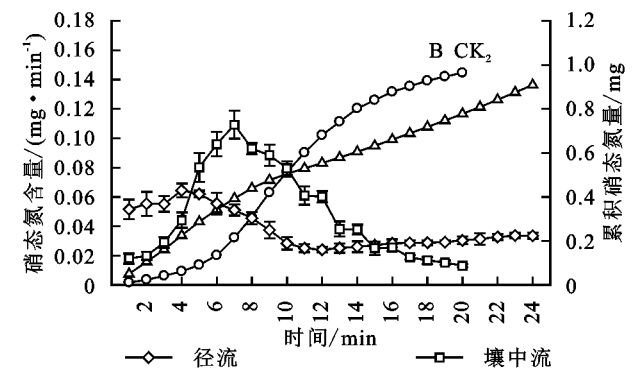
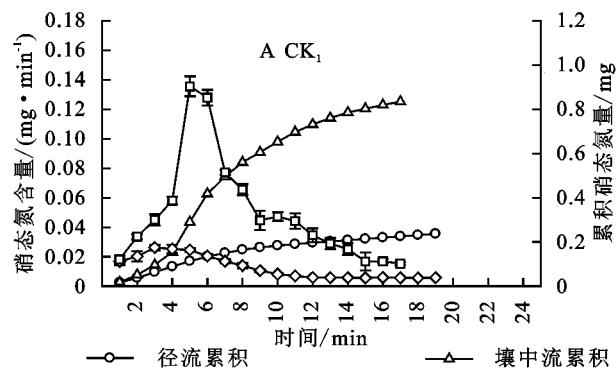


图 4 2 次试验地表径流、壤中流土壤硝态氮含量及累积量变化

从图 5A 可以看出,地表径流产生至约 12 min 时段内 2 组试验均表现为硝态氮迁移量先上升后下降,在约 4 min 时达到最大值,12 min 以后趋于平稳,这与产流之前雨滴对表土击溅掺混,使得表土硝态氮产流立即进入径流有关,地表径流形成

后,表层水流阻碍或者弱化了雨滴的击剑掺混作用,使得土壤养分只能依靠对流弥散作用进入径流,进入强度减小,同时趋于稳定。CK<sub>2</sub> 累积径流迁移量高于 CK<sub>1</sub> 说明硝态氮径流迁移与降雨强度正相关(图 5A)。

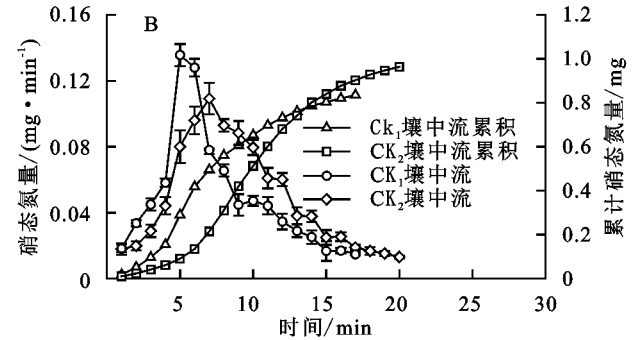
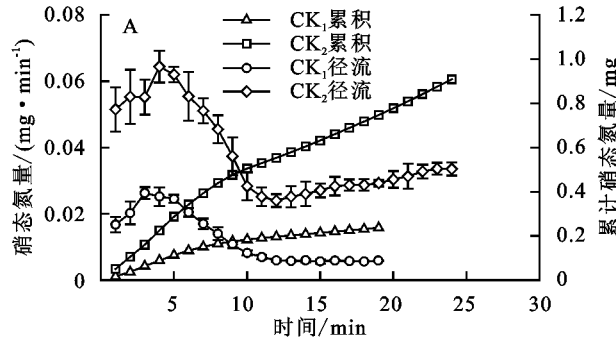


图 5 2 次降雨地表径流、壤中流及其累积硝态氮迁移对比

图 5B 显示 2 次试验硝态氮随壤中流出流过程相似,包括峰值及增长和消落过程。2 次试验峰值分别为 0.10, 0.09 ml/(min · m), 平均为 0.095 ml/(min · m)。CK<sub>2</sub>壤中流历时长于 CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>硝态氮壤中流迁移总量高于 CK<sub>1</sub>, CK<sub>1</sub>与 CK<sub>2</sub>迁移总量分别为 0.65, 0.74 mg/m; 上升段分别为 0.22, 0.17 mg/m, 平均约 0.20 mg/m; 消退段分别为 0.26, 0.24 mg/m, 平均约为 0.25 mg/m。2 次试验硝态氮壤中流迁移过程较为接近,进一步说明壤中流迁移遵循固定出流原理,据此,可依据前述壤中流流量计算方法,建立黑土区坡耕地土壤硝态氮壤中流迁移量计算模型,计算本研究两次试验硝态氮迁移总量分别为 0.64, 0.82 mg/m, 误差为 1.2%, 11.8%, 误差相对较小,说明文中提出的硝态氮壤中流迁移量计算方法是可行的。文中提出的计算方法仅适合出现了壤中流峰值的情况,处于增长阶段即进入消退过程的情况不适用,同样也不适合壤中流流量的确定。可针对不同下垫面条件、不同可溶性养分,依据本文提出的方法,建立壤中流养分迁移计算模型库,实时计算可溶性养分壤中流迁移量。

## 4 结论

(1) 黑土区地表径流受降雨强度及土壤初始含水量影响显著。土壤初始含水量相近情况下,降雨强度小,地表径流产流时刻后移,产生地表径流前入渗到土壤中水量增加,产生地表径流时湿润体狭长。黑土区坡耕地壤中流产生时,湿润锋下移至约 14 cm, 深入犁底层,壤中流产流时刻土壤剖面含水量基本一致,不受降雨强度、土壤初始含水量影响,壤中流产生遵循固定条件。

(2) 黑土区坡耕地不同降雨特征壤中流增长及消退变化历程一致,快速增长阶段历时约 6 min, 消退阶段历时约 14 min, 中间稳定阶段壤中流径流强度约 6 ml/(min · m)。壤中流区别于地表径流之处在于其过程稳定性受降雨强度影响小,存在稳定的增长及衰减过程。研究区壤中流上升阶段累积单宽出流量约 9.0 ml/m, 消退阶段累积单宽出流量约 21.2 ml/m。基于壤中流出流过程的稳定性,提出黑土区坡耕地任意降雨壤中流出流量计算方法,并证明其适用性,简化了壤中流模拟复杂性。同时试验证明了玉

米根系增强了壤中流水平迁移强度。

(3) 黑土区土壤硝态氮随壤中流迁移能力远高于地表径流,壤中流迁移是土壤硝态氮水平运移的主要途径。不同降雨特征及土壤初始含水量条件下,从地表径流产生时刻历时约 12 min,硝态氮迁移量先上升后下降,约在 4 min 达到最大值,12 min 以后趋于平稳。壤中流硝态氮迁移历程稳定,包括峰值、增长及消退过程,2 次试验峰值平均为 0.095 ml/(min·m),上升段累积量分别为 0.22,0.17 mg/m,消退段分别为 0.26,0.24 mg/m。基于硝态氮迁移历程稳定性,提出研究区坡耕地土壤硝态氮壤中流迁移量计算模型,模拟计算了本文 2 次试验土壤硝态氮壤中流迁移量,误差为分别为 1.2%,11.8%,相对较小,证实所建模型适用性。

基于文中得出的部分结论,可以深入研究土壤肥料空间有效性,提高肥料利用效率,也可以促进农业面源污染由定性研究向定量研究的转变。

#### 参考文献:

- [1] 许凤英,秦亚平,王晓玲,等.不同新型功能尿素对水稻产量及氮肥吸收利用率的影响[J].湖北农业科学,2014,53(10):2257-2263.
- [2] 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. I : 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [3] Liang X Q, Xu L, Li H, et al. Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011,36(9/11):395-400.
- [4] Sharma P, Shukla M K, Sammis T W, et al. Nitrate-nitrogen leaching from three specialty crops of New Mexico under furrow irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2012,109:71-80.
- [5] Zhao B Q, Li X Y, Liu H, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: The risk of groundwater pollution by nitrate[J]. NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences, 2011,58(3):177-183.
- [6] 商放泽,杨培岭,任树梅.水氮量对层状包气带土壤氮素迁移累积的影响分析[J].农业机械学报,2013,44(10):112-121.
- [7] 刘小刚,张富仓,杨启良,等.不同沟灌方式下玉米根区矿物氮迁移动态研究[J].中国生态农业学报,2011,19(3):540-547.
- [8] 张长保,王全九,樊军,等.模拟降雨下初始含水量对砂黄土硝态氮迁移特征的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):894-899.
- [9] 段然,汤月丰,文炯,等.减量施肥对湖垵旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(5):536-543.
- [10] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015,199:34-42.
- [11] Du H, Gao W, Li J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019,213:882-893.
- [12] 阮晓红,王超,朱亮.氮在饱和土壤层中迁移转化特征研究[J].河海大学学报,1996,24(2):51-55.
- [13] 王超.氮类污染物在土壤中迁移转化规律试验研究[J].水科学进展,1997,8(2):176-182.
- [14] Li J, Tong J, Xia C, et al. Numerical simulation and experimental study on farmland nitrogen loss to surface runoff in a raindrop driven process[J]. Journal of Hydrology, 2017,549(1):754-768.
- [15] 安娟,郑粉莉,李桂芳,等.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[J].生态学报,2011,31(24):7579-7590.
- [16] 李德明,郭成久,宁睿.初始含水量对黑土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):17-20.
- [17] Sang X, Wang D, Lin X. Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2016,163:185-194.
- [18] 李艳梅,袁霞,张亚丽,等.黄绵土坡面土壤矿质氮素径流流失与入渗特征研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):246-251.
- [19] 花伟东,郭亚芬,张忠学.坡耕地局部打破犁底层对水分入渗的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):213-216.
- [20] 董文财,付强,王全九,等.植株影响下大豆农田土壤水分对降雨的响应模型研究[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(2):276-285.
- [21] 孔达,王立权,董文财,等.犁底层及作物根系影响下壤中流形成机理研究[J].节水灌溉,2017(6):1-5.
- [22] 曹程鹏,张飞,段建明.黑土区坡耕地壤中流水平迁移动力学模型研究[J].水土保持研究,2019,26(4):259-264.
- [23] Dong W C, Cai F F, Wang Q J, et al. Modelling interflow under the influence of plough pans for a sloping field [J]. Soil Science Society of America Journal, 2019,83:1468-1478.