

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0014

王龙凤,夏军,于静洁,等.降水产流非线性驱动下坡地硝态氮产污过程试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):122-130. WANG L F, XIA J, YU J J, et al. Experiment on nitrate-N pollutant generation process driven by nonlinear rainfall-runoff[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 122-130. (in Chinese)

降水产流非线性驱动下坡地硝态氮产污过程试验

王龙凤¹, 夏军^{2,5}, 于静洁^{2,4}, 乔云峰^{3,4}, 史超⁶, 王强⁷, 赵彦军²

- (1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 6. 宁波市海曙区农业农村局, 浙江 宁波 315000; 7. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

摘要:为正确认识坡地氮素流失过程,同时为降水产流非线性驱动下流域污染负荷模型的构建提供理论依据,研发自动化程度高、接近天然降雨的人工模拟降雨产流产污试验装置,试验研究不同降雨强度和前期土壤含水率条件对产流及近地表土壤中硝态氮溶出过程的影响,利用演绎推理法探讨近地表土壤中硝态氮溶出系数与降雨产流及土壤含水率的关系。结果表明:降雨强度越大,前期土壤含水率越高,产流量、累积产流量越大;产流量以幂函数形式随时间不断增加趋于稳定,同时,降雨初期地表产流中硝态氮负荷及累计负荷量也越大;后期随着产流量的增加而呈幂函数形式衰减,最终又随着产流量的稳定而趋于稳定;近地表土壤中硝态氮的溶出系数受控于降雨产流,同时与土壤湿度存在指数函数关系。探讨的降雨产流-溶出系数-土壤含水率的数值关系对模拟高时间分辨率降雨产流非线性驱动下坡地硝态氮产污过程具有一定的参考价值。

关键词:土槽;坡地;硝态氮;降雨产流产污试验;产污过程

中图分类号:TV121 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



我国作物生产过程中农药化肥过量施用导致土壤氮素盈余,土壤层氮素的输移流失通常伴随复杂的降雨、径流、入渗等水文过程。硝态氮不易被土壤吸附,常以溶解态形式存在,主要通过淋溶形式随入渗水向地下迁移或随地表径流输移的形式流进入水体。近年来,全球气候变化导致强降水事件增多^[1],使土壤中多余的氮素被暴雨或次暴雨冲刷出来并伴随地表径流输移,引起水体氮含量超标,硝酸盐污染已成为世界范围内许多河流共同面临的水环境问题^[2-3]。中国南方丘陵坡地的特殊地形及土壤理化性质,使得驱动氮素输移的水文过程具有强烈的非线性。因此,正确理解降雨产流非线性驱动下坡面产流中硝态氮随时间的变化过程对认识坡地氮

素流失过程至关重要。

降雨和前期土壤含水率是影响天然产流及非点源污染物流失过程的 2 个重要因素^[4-5],目前,国内外相关学者^[6-14]已开展大量不同下垫面覆盖、土壤含水率、坡度条件下的降水径流研究。对于降雨产流伴随的产污过程,主要分为扩散理论和混合理论模型^[15]。扩散理论假定溶质通过分子弥散进入地表径流,溶质运移及伴随的地表径流迁移均符合菲克定律。混合理论认为在雨滴击溅及径流冲刷作用下,土壤表面形成了一定厚度的扰动层,扰动层内的溶质参与径流迁移并遵循质量平衡。相关学者^[16-22]针对混合理论模型开展了大量相关研究,但对于以扩散理论为基础的降雨产流伴随的产污过程,

收稿日期:2021-04-15 修回日期:2021-08-11 网络出版时间:2021-08-26

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210825.1501.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(41890824);中国地质调查局地质调查项目(DD20190322)

作者简介:王龙凤(1988—),女,山东潍坊人,高级工程师,博士,主要从事流域水资源调查评价与可持续利用研究。E-mail:897336501@qq.com

通信作者:夏军(1954—),男,湖北孝感人,中国科学院院士,博士生导师,长期从事水文学及水资源研究。E-mail:xiajun666@whu.edu.cn

目前多数学者^[23-25]为了简便将产污过程中的污染物溶出系数当作一个常数考虑,缺乏详细的定量描述以及机理研究。因此,以第四纪红黏土发育的红壤土为研究对象,开展长为 3.0 m、宽为 1.5 m 的小尺度降雨产流产污土槽对比试验,限制汇流影响,研究不同降雨强度和前期土壤含水率条件对产流及近地表土壤中硝态氮溶出过程的影响,探讨降雨产流非线性驱动下坡地硝态氮产污过程,为降水产流非线性驱动下流域污染负荷模型的构建提供理论依据。

1 试验装置

本研究采用的人工模拟降雨产流产污试验装置主要由人工模拟降雨系统、下垫面系统、产流测定及取样系统组成,见图 1。其中:人工模拟降雨系统是摇摆式针管模拟降雨系统,由供水系统、喷管摆动系统、降雨强度调节系统等部件构成;下垫面系统由试验土槽、下垫面土体及土壤含水率测定装置构成;产流测定及取样系统包括产流测定、坡面产流样取样及硝态氮浓度分析测试等。

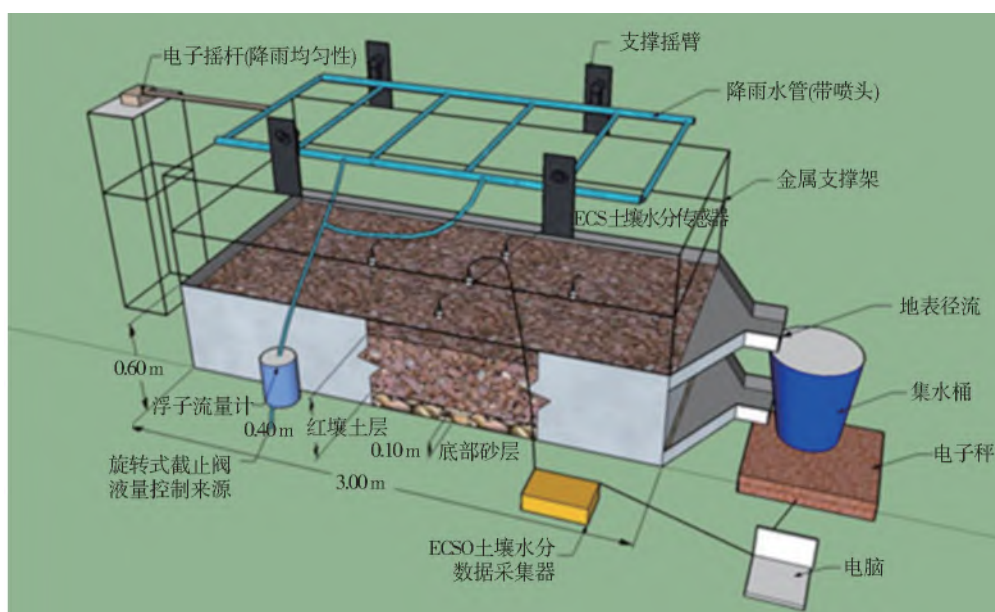


图 1 人工模拟降雨产流产污试验装置

Fig. 1 Artificial simulation rainfall-runoff-pollutant generation experiment

1.1 人工模拟降雨系统

1.1.1 供水系统

供水系统由集水桶、直流水泵和减压阀组成。其中:直流水泵理论扬程达 20 m,最大流量达 2 m³/h,保证了人工模拟降雨所需的最大水头和流量;减压阀起到消减水压,稳定供水的作用。

1.1.2 喷管摆动系统

喷管摆动系统由 6 根喷管及步进电机滑台组成。在步进电机滑台驱动力作用下自动控制喷管摆动的范围、周期、速度,实现喷管匀速摆动,进而保证降雨强度空间分布的均匀性,克服了通过人工手摇方式实现喷管匀速摆动所导致的降雨空间分布均匀性效果差的缺点。试验中 6 根喷管向上喷水的高度达 1.5 m 以上,可使喷水达到自由落体雨滴的稳定速度,达到模拟自然降雨的作用。

1.1.3 降雨强度调节系统

试验过程中降雨强度通过量程为 100~1 000 L/h、分度值为 20 L/h 的玻璃转子流量计,旋转式截

止阀,水表及工业上标准规格的不锈钢点胶喷头共同调节控制,可实现模拟降雨强度范围为 30~500 mm/h。

1.2 下垫面系统

1.2.1 试验土槽

试验所用钢制土槽尺寸为长 3.0 m,宽 1.5 m,高 0.6 m,坡度为 15°。土槽底端均匀打孔以模拟天然透水坡面,土槽四周及底部均采用 4 mm 厚度整块钢板并利用二氧化碳保护焊接技术焊接,以保证填装土重、土体夯实作业、降雨、放水等对钢槽使用无影响。在土槽向下倾斜的末端径流出口位置配有“V”形地表及地下集流装置,便于及时方便收集和观测地表径流和地下出流。

1.2.2 下垫面土体

钢槽中所填土壤为第四纪红黏土发育的红壤土。钢槽采用分层填土方法:填土前在钢槽底板 0.1 m 深度处先铺设一层纱布,防止土壤漏洒;出口部分安装过滤网,防止产流过程中土壤流失并起到

排水作用;之后在下部 0.1~0.4 m 部分采用分层填土方式填装过筛并去除杂质的红壤土,每隔 0.1 m 填装一层,在填装下一层土壤之前,抓毛之前填好的土壤表面,防止土壤分层严重;钢槽最上层 0.1 m 范围为径流淹没区,土体表面及地表产流出口段处于相同的倾斜面上。为保证钢槽中所填土体性质同自然条件下土体趋于一致,填装土体后自然沉降时间超过 2 a。经测试,钢槽中土壤容重为 1.23 g/cm^3 ,孔隙率为 0.53,饱和含水率为 0.45,田间持水率为 0.34,其含水率变化大、下渗能力适中、密度及压缩性较低,是研究土壤含水率变化过程的较为理想的一种土体^[14]。

1.2.3 土壤含水率测定

为获得近地表土壤含水率的连续变化过程,在距离钢制土槽上部 1.0 m 及 1.5 m 处,土槽下部 1.0 m 处,土槽左部 0.5 m 及右部 0.5 m 处采用五点分法垂直在表面土体埋藏 5 个 Decagon 公司生产的 EC-5 电容式土壤水分传感器,覆盖了整个土壤表层的重要位置。土壤水分传感器测定的有效深度约为 9 cm。利用配套的数据采集器 EM-50 每隔 1 min 采集 1 次土壤水分传感器实时监测的电压值传输至电脑,并通过不同土壤含水率同电压值的拟合曲线将土壤水分传感器记录的电压值转化为土壤含水率。

1.3 产流测定与取样系统

1.3.1 产流测定

在钢制土槽下部与土体表面高度一致的位置设有“V”形出口,当产流发生,土体表面积水层形成后,在重力侧向分力作用下流入置于电子秤上的大桶内,借助电子秤 VB 程序采样系统,通过串口数据线将各时刻电子秤测得的产流量的累计质量数据传输至电脑,实现数据自动采集。电子秤最大量程为 100 kg,数据记录时间间隔设置为 1 min。

1.3.2 坡面产流取样与硝态氮浓度分析

试验过程:前 20 min 每 2~3 min 取 1 个径流样,之后每隔 5 min 或 10 min 取 1 个径流样;取样后立即滴加浓硫酸使样品的 pH 值维持在 2 以下,之后在 4 ℃ 环境下保存;坡面产流样中硝态氮浓度通过硫酸肼还原法利用 SMARTCHEM200 全自动间断化学分析仪测试。

2 试验方法与数据处理

在模拟试验进行前 48 h,将一定量的硝酸氢钙(约 125 g)用喷壶溶解后,在避风处均匀喷洒在

土槽表面,尽量使喷壶喷射为雾状,减小对表层土壤的冲击作用而导致的结皮现象。开展试验前,各土槽都用塑料薄膜密封覆盖并统一静置。试验时仅研究裸土产流产污过程以排除土地覆被因素的影响,同时,保持坡面相对平整排除填注的影响。

2.1 降雨强度设置与标定

根据预试验时土壤表面形成明显水流通道及地表产流历时,出现稳定产流系数及非稳定产流历时等将人工模拟降雨强度条件设置为小雨 40 mm/h、中雨 50 mm/h 及大雨 60 mm/h。本试验设置降雨强度为影响降雨因素的唯一因子,因此需事先标定降雨强度,保证降雨空间分布均匀、时间过程平稳,消除降雨的雨型、时空分布等因素影响,提升人工模拟降雨系统精度。

对于降雨强度时间过程平稳性标定,在土槽表面覆盖塑料薄膜,选择对应降雨强度的不锈钢点胶喷头类型,用量筒集水并称量不同降雨强度条件下 10 min 内各时刻的降雨量,结果显示降雨过程线波动范围小于 $\pm 15\%$,认为降雨强度符合试验设计值要求。

对于降雨强度空间分布均匀性检验,在降雨区内均匀放置 10 行、5 列共 50 个小纸杯承接降雨过程中不同位置的降雨,纸杯内放置石块固定;降雨过程结束后,量取各纸杯内的水量,定量化降雨强度空间分布,结果显示其空间波动范围小于 $\pm 10\%$,分布比较均匀,符合要求^[14]。

2.2 前期土壤含水率设置与土壤水分传感器标定

前期土壤含水率是降雨产流过程的重要初始条件,同时近地表土壤含水率也随地表产流过程不断发生变化,根据实际试验情况,将试验土体表面的前期土壤含水率条件设置为中(0.20)、高(0.34)两种情况。考虑到 EC-5 电容式土壤水分传感器的工作原理是土壤的介电常数随水分的变化表现为电容量变化,监测的电压值与土壤含水量存在线性关系^[26],同时,土壤水分传感器受土壤质地分异、回填压缩、土层沉降等因素的影响,因此试验前需标定电压值与土壤含水率相关关系。

利用环刀取若干试验土壤样组,设置不同土壤湿度间隔条件,读取土壤水分传感器的电压值,同时采用烘干称重法测量当前真实土壤含水率,之后建立两者线性关系。由于土壤含水率的均值变化对于产流的影响比一定尺度上空间差异大^[27],因此试验

中选取近地表 5 组土壤含水率各个时段的平均值作为土壤含水率过程线。

2.3 产流数据处理

水的体积为质量与密度的比值,通过将各时刻电子秤记录的产流累计质量值序列转换为体积,再对相邻时刻产流的体积累计值取差值获取连续的流量序列,流量除以土体投影面积求取产流深序列。具体计算公式为

$$Q_i = (M_i - M_{i-1}) / (\rho \cdot \Delta t) \quad (1)$$

式中: Q_i 为 i 时刻的流量, dm^3/min ; M_i 为 i 时刻电子秤测得的累计径流量的质量, kg ; ρ 为水的密度, g/cm^3 ; Δt 为时间步长, 1 min 。

虽然试验过程中地表产流中混带泥沙,一方面因其数量较少可忽略对水的密度产生的影响,另一

方面产流累计质量求差值过程中相邻的泥沙重量累计量被减去,因此,消除了泥沙带来的误差项。

3 结果分析

3.1 降雨强度对坡面产流产污过程的影响

3.1.1 降雨强度对坡面产流特征的影响

在降雨强度为 40、50、60 mm/h,前期土壤含水率为 0.34 条件下,坡面产流量及累计产流量随时间变化过程见图 2。在降雨初期产流量以幂函数形式随时间不断增加,10 min 后趋于稳定,且在同一时刻随降雨强度的增大产流量增大;在不同降雨强度条件下的累计产流量随时间呈线性增加,降雨强度越大,单位时间、单位面积受雨量越大,累计产流量的斜率越大,累计产流量增加的速率越快。

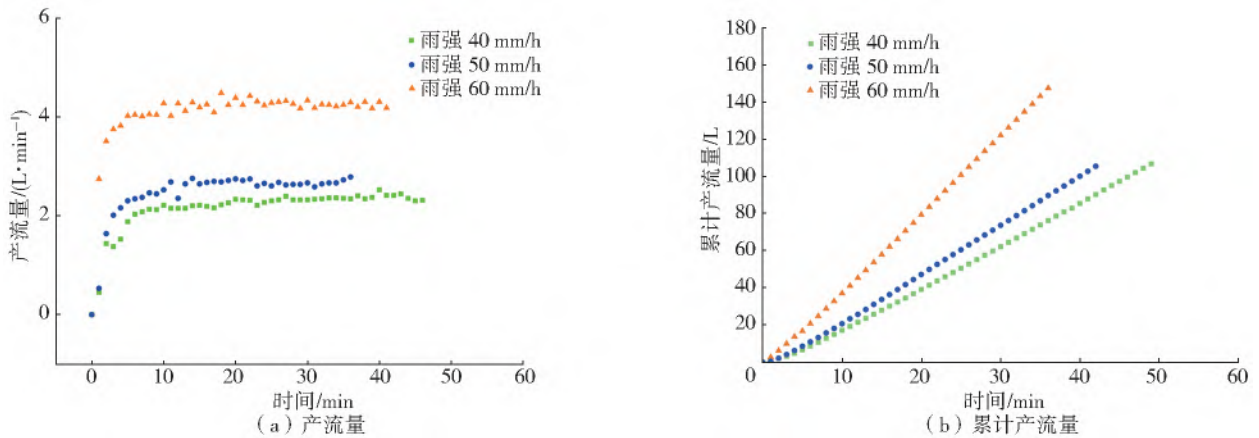


图 2 不同雨强条件下产流量及累计产流量随时间的变化过程

Fig. 2 Variation with time of runoff and cumulative runoff under different rainfall intensities

3.1.2 降雨强度对近地表土壤中硝态氮溶出过程的影响

降雨强度为 40、50、60 mm/h,前期土壤含水量为 0.34,近地表土壤初始硝态氮含量约为 570 mg/kg 条件下,坡面产流中硝态氮负荷及累计负荷随时间的变化过程见图 3。由于硝态氮不易被土壤颗粒吸

附,土壤中的硝态氮在雨滴击溅及径流冲刷作用下,不断地被暴露在土壤表面,降雨初期地表产流中携带的硝态氮浓度及负荷很高,之后呈幂函数衰减变化,并且在前 10 min 内变化较快,最后又随着坡面产流的稳定而趋于稳定。在同一时刻,降雨强度越大,硝态氮负荷及累积负荷量也越大。

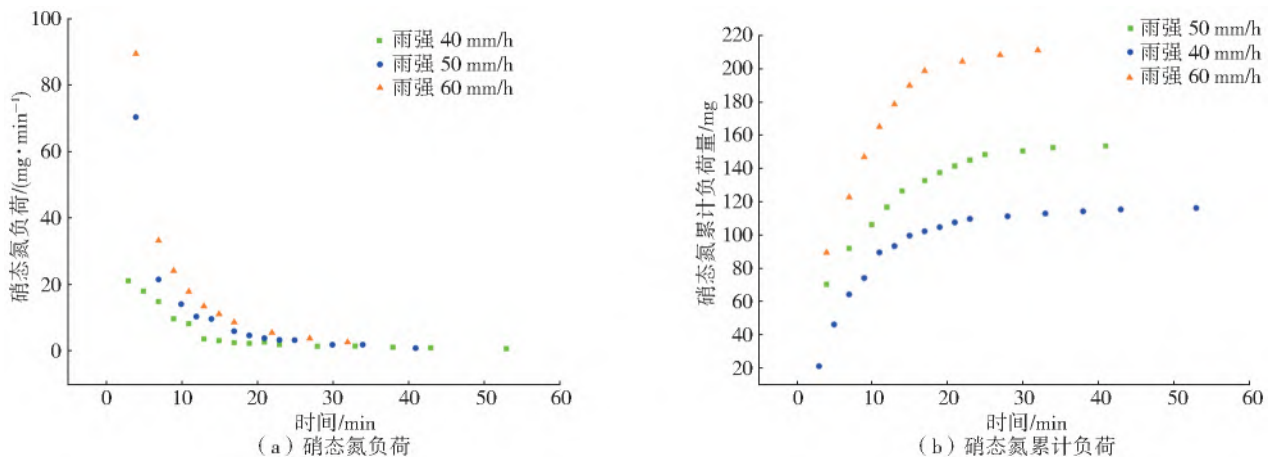


图 3 不同雨强条件下坡面产流中硝态氮负荷及累计负荷随时间的变化过程

Fig. 3 Variation with time of nitrate-N load and cumulative nitrate-N load under different rainfall intensities

3.2 前期土壤含水率对产流产污过程的影响

3.2.1 前期土壤含水率对坡面产流特征的影响

在前期土壤含水率为 0.20、0.34, 降雨强度为 60 mm/h 条件下, 产流量、累计产流量随时间的变

化过程见图 4。前期土壤含水率越高, 土壤入渗能力减弱, 产流量及累计产流量越大, 产流量趋于稳定的值越大, 产流量趋于稳定的时间越短; 在产流量趋于稳定之前, 产流量以幂函数形式随时间不断增加。

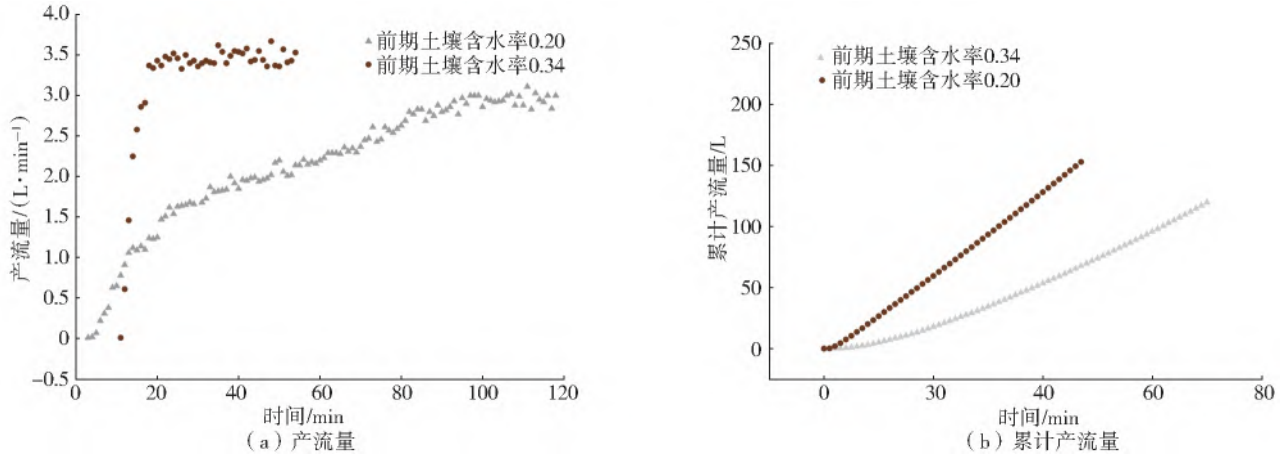


图 4 不同前期土壤含水率条件下产流量及累计产流量随时间的变化过程

Fig. 4 Variation with time of runoff and cumulative runoff under different antecedent soil moisture

3.2.2 前期土壤含水率对近地表土壤中硝态氮溶出过程的影响

降雨强度为 60 mm/h, 前期土壤含水率为 0.20、0.34, 近地表土壤初始硝态氮含量约为 375 mg/kg 条件下, 产流中硝态氮负荷及其累计负荷量随时间的变化过程见图 5。产流中硝态氮负荷随时间呈幂函数衰减变化趋势, 在同一时刻, 前期土壤含水率越大, 地表产流中硝态氮负荷及累积负荷量越大。

当近地表土壤初始含水率较低时, 产流中硝态氮浓度较低, 主要是因为降雨前期, 土壤入渗很快, 初始产流时间延迟, 大部分硝态氮随入渗水淋溶至深层土壤, 导致地表产流中较低的硝态氮浓度。然而随着初始土壤含水率的增大, 土壤的入渗能力减弱, 产流较快, 近地表土壤中的硝态氮能够迅速随产流溶出土壤表面, 从而使得地表产流中有较高浓度的硝态氮, 这同王辉等^[28]的研究结果相一致。

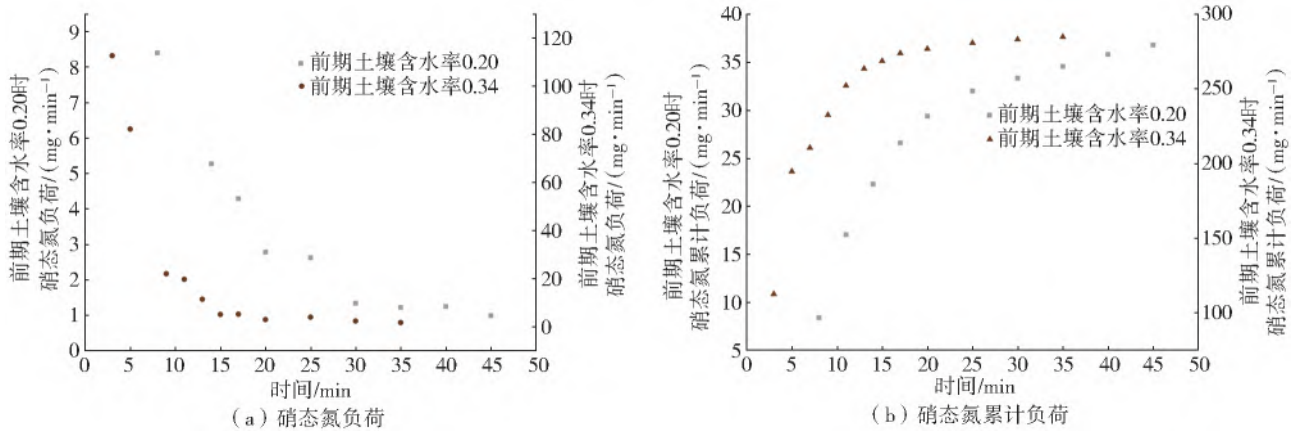


图 5 不同初始土壤含水率条件下硝态氮负荷及累计负荷随时间变化过程

Fig. 5 Variation with time of nitrate-N load and cumulative nitrate-N load under different antecedent soil moisture

3.3 近地表土壤中硝态氮产污过程研究

降雨产流与近地表土壤发生作用, 近地表土壤中的污染物在浸提和冲洗作用下向径流扩散, 根据土壤溶质地表径流损失的扩散理论, 溶质运移符合菲克定律, 溶质通过分子弥散进入地表径流, 同时假定近地表土壤中污染物能够持续补给净雨并被径流携带进入水体, 近地表溶解态污染物在降雨径流期

间的产污过程符合一阶动力学公式为

$$c_{t+1} = c_t e^{-kt} \quad (2)$$

式中: c_{t+1} 和 c_t 分别为 $t+1$ 时刻和 t 时刻从土壤中溶出的污染物质量浓度, mg/L; k 为污染物的溶出系数, 单位为 Δt 时刻的倒数。

由式(2)迭代计算可得

$$c_t = c_0 e^{-kt_{total}} \quad (3)$$

式中: c_0 为初始时刻土壤中溶解态污染物溶出质量浓度,mg/L; c_t 为 t 时刻土壤中溶解态污染物溶出质量浓度,即 t 时刻地表产流中溶解态污染物质量浓度,mg/L; t_{total} 为总时间,min。

对式(3)两边取以 \ln 为底的对数,则土壤中溶解态污染物溶出系数与时间 t 的关系为

$$k = -\ln \frac{c_t}{c_0} / t_{total} \quad (4)$$

降雨产流是水文循环的一个重要环节,是近地表土壤中硝态氮溶出的主要驱动力,降雨产流产污密切相关,土壤含水率是影响降雨产流产污过程的关键变量之一^[29],考虑到近地表土壤中硝态氮的溶出过程除了受下垫面土壤含水率影响外,还受降雨产流非线性驱动影响,因此,本研究识别近地表土壤中硝态氮溶出系数与土壤含水率相关关系时,为了

研究方便,直接将测得的地表产流量 $R_s(t)$ 除以硝态氮溶出系数 k ,归结为识别 R_s/k 与近地表土壤含水率 $W_s(t)$ 的关系。同时,考虑到试验用钢制土槽的尺寸及土壤水分传感器测定的有效深度,最终归结为识别 $[R_s(t)/k]/4.5$ 与 $W_s(t) \times 0.9$ 的相关关系。

基于TableCurve软件^[30]利用演绎推理法对典型试验场次下两者关系进行拟合(图6),得到降雨产流非线性驱动下两参数硝态氮溶出系数同近地表土壤含水率公式,确定性系数 R^2 可达0.68,平均相对误差为-28%,拟合结果比较理想,能够较好地描述近地表土壤中硝态氮溶出过程。

$$\frac{R'_s(t)}{k} = a + be^{-W'_s(t)} \quad (5)$$

式中: $R'_s(t)$ 为 $[R_s(t)/k]/4.5$ 计算后所得; $W'_s(t)$ 为 $W_s(t) \times 0.9$ 计算后所得; a 、 b 为需要拟合的参数。

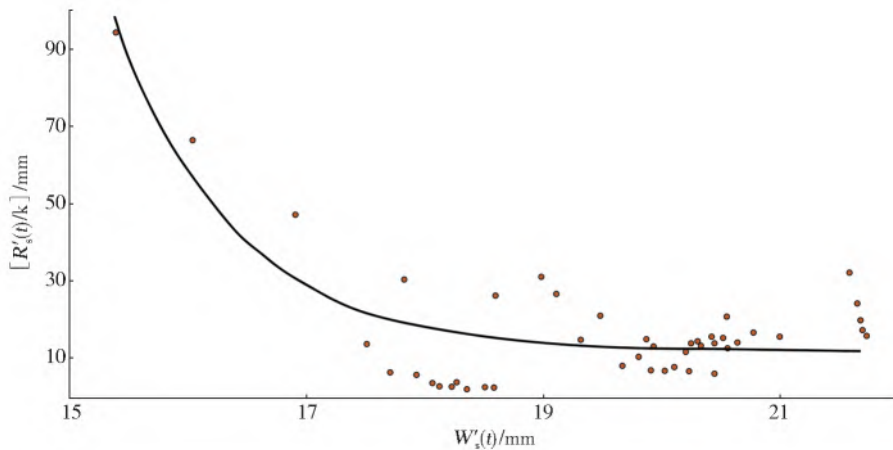


图6 典型场次试验下 $R'_s(t)/k$ 随近地表土壤含水率的变化过程及拟合结果
Fig.6 Variation process of $R'_s(t)/k$ with near-surface soil moisture and its fitting result

由式(5)得到产流-近地表土壤中硝态氮溶出系数-土壤含水率的数值关系式(6)。可以看出,产流对近地表土壤中硝态氮的溶出系数起着决定性作用,同时,降雨产流非线性驱动下的近地表土壤中污染物的溶出系数与土壤含水率存在指数函数关系。俞跃等^[31]研究亦表明,产流系数越大,径流中携带的污染物越多;Ouyang等^[5]研究亦表明,不同降雨条件、不同土壤含水率是影响非点源氮素流失的重要因子。

$$k = \frac{R'_s(t)}{a + be^{-W'_s(t)}} \quad (6)$$

因此,得到近地表土壤中硝态氮产污过程公式(7),可以进一步利用数值积分方法求得产流中硝态氮负荷量。

$$C_t = C_0 \exp\left(\frac{R'_s(t)}{a + be^{-W'_s(t)}} \Delta t\right) \quad (7)$$

式中: C_t 为 t 时刻产流中硝态氮质量浓度,mg/L; C_0

为初始时刻产流中硝态氮质量浓度,mg/L; $R'_s(t)$ 为 t 时刻单元产流量,m/min; $W'_s(t)$ 为 t 时刻土壤湿度,m; Δt 为时间间隔,min。

4 结 论

本研究设计的人工模拟降雨产流产污试验装置完善、高效、准确,在人工模拟降雨系统的准确性、均匀性和天然性,以及土壤含水率和流量观测记录的自动化、准确性和时间分辨率等系列指标上有着明显的优势。

在降雨初期产流量以幂函数形式随时间不断增加,之后趋于稳定;降雨强度越大,前期土壤含水率越高,产流时间越快,产流量、累积产流量越大,产流量趋于稳定的时间越短,产流量的稳定值越大。

在降雨初期地表产流中硝态氮负荷量很高,后期随着产流量的增加呈幂函数形式衰减,最终又随着地表产流量的稳定而趋于稳定,且在同一时刻随

降雨强度、前期土壤含水率的增大,硝态氮负荷及累积负荷增加,产污负荷量趋于稳定的时间越短。

降雨产流非线性驱动下两参数硝态氮溶出系数同近地表土壤含水率公式能够较好地描述近地表土壤中硝态氮溶出过程。产流对近地表土壤中硝态氮的溶出系数起着决定性作用,同时,降雨产流非线性驱动下的近地表土壤中污染物的溶出系数与土壤含水率存在指数函数关系。

本研究探讨的降水产流非线性驱动下坡地硝态氮产污过程,对降雨径流非线性驱动下流域污染负荷模型的构建具有一定的参考价值,下一步还需积累丰富的试验数据深入开展降雨-产流-产污机理研究。

致谢

试验还得到了刘彩堂高级工程师,张翔、张利平、王红萍、余敦先等教授的协助及江西省水土保持科技园的大力支持,在此致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2020)[M]. 北京:科学出版社,2020. (Climate Change Center, China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China 2020[M]. Beijing: Science Press,2020. (in Chinese))
- [2] LIU S, XIE Z H, ZENG Y J, et al. Effects of anthropogenic nitrogen discharge on dissolved inorganic nitrogen transport in global rivers[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(4):1493-1513. DOI:10.1111/gcb.14570.
- [3] 陈淑娴,尚睿华,冯予诚,等. 兴隆水利枢纽对汉江河岸带氮素分布特征的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3):182-190. (CHEN S X, SHANG R H, FENG Y C, et al. Effects of Xinglong Hydro-Junction on nitrogen distribution in the Hanjiang River riparian zone [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3):182-190. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006056.
- [4] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002. (XIA J. Theory and methods of hydrological nonlinear systems [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2002. (in Chinese))
- [5] OUYANG W, XU X T, HAO Z C, et al. Effects of soil moisture content on upland nitrogen loss[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 71-80. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.053.
- [6] 王占礼,黄新会,张振国,等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. *水土保持通报*, 2005(4):1-4. (WANG Z L, HUANG X H, ZHANG Z G, et al. Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005(4):1-4. (in Chinese)) DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2005.04.001.
- [7] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005(2):5-8. (CHEN H S, SHAO M A, ZHANG X C, et al. Field experiment on hillslope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005(2):5-8. (in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stbctb.2005.02.002.
- [8] 刘相超,宋献方,夏军,等. 华北山区坡地土壤水分动态实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006(4):76-89. (LIU X C, SONG X F, XIA J, et al. An experimental study of the dynamic regime of soil water in mountainous slopes in northern China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006(4):76-89. (in Chinese)) DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2006.04.02.
- [9] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008(5):65-68. (WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008(5):65-68. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: NYGU.0.2008-05-015.
- [10] 闵雷雷,于静洁,宋闰柳,等. 太行山区侧柏林地人工降雨下的入渗特性[J]. *水土保持学报*, 2010(1):28-32, 68. (MIN L L, YU J J, SONG R L, et al. Infiltration characteristics under simulated rainfall over *platycladus orientalis* land in Taihang Mountainous region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010(1):28-32, 68. (in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stbctb.2010.01.015.
- [11] 张向炎,史学正,于东升,等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1):23-29. (ZHANG X Y, SHI X Z, YU D S, et al. Effects of antecedent soil moisture on hillslope runoff-generation and soil erosion over red soil-mantled landscape[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1):23-29. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2010.01.003.
- [12] 穆文彬,李义豪,李传哲,等. 不同坡度和前期土壤含水率条件下裸地降雨产流试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6):6-11. (MU W B, LI Y H, LI C Z, et al. Rainfall runoff test on bare soil with different slope gradient and soil moisture content[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6):6-11. (in Chinese)) DOI: 10.

- 13476/j.cnki.nsbdkq.2016.06.002.
- [13] 杨默远. 前期土壤含水量对产流影响的实验、机理与模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016. (YANG M Y. Experimental and modeling study on the influencing mechanism of antecedent soil water content on runoff generation process[D]. Beijing:Chinese Academy of Sciences,2016. (in Chinese))
- [14] 史超. 考虑雨强和土壤湿度的时变增益产流机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2017. (SHI C. Expoloration of the runoff generation mechanisms of time variant gain theory considering rainfall intensity and soil moisture condition[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese))
- [15] GAO B, WALTER M T, STEENHUIS T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(4): 291-304. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2004. 03. 026.
- [16] DONIGIAN A S. Agricultural runoff management (ARM) model version II: Refinement and testing [M]. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Environmental Research Laboratory, 1977.
- [17] AHUJA L R, SHARPLEY A N, LEHMAN O R. Effect of soil slope and rainfall characteristics on phosphorus in runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 1982, 11(1): 9-13. DOI: 10. 2134/jeq1982. 00472425001100010003x.
- [18] HEATHMAN G C, AHUJA L R, LEHMAN O R. The transfer of soil surface applied chemicals to runoff[J]. Transactions of American Society Agriculture Engineering, 1985, 28(6): 1909-1915. DOI: 10. 13031/2013. 32540.
- [19] 王全九, 王文焰, 沈冰, 等. 降雨-地表径流-土壤溶质相互作用深度[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998(2): 42-47. (WANG Q J, WANG W Y, SHEN B. Interacting depth of rainfall-runoff-soil solute[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998(2): 42-47. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcb. 1998. 02. 007.
- [20] 王全九, 邵明安, 李占斌, 等. 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(2): 68-72. (WANG Q J, SHAO M A, LI Z B, et al. Analysis of simulating methods for soil solute transport with runoff in loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999(2): 68-72. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3409. 1999. 02. 014.
- [21] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 降雨-径流-土壤混合层深度研究进展[J]. 农业工程学报, 2007(9): 283-290. (ZHANG Y L, LI H E, ZHANG X C, et al. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction[J]. Transactions of the CSAE, 2007(9): 283-290. (in Chinese)) DOI: 1002-6819(2007) 9-0283-08.
- [22] 朱焱, 刘琨, 刘昭, 等. 非饱和坡面水分与氮素迁移耦合模型与应用[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 126-134. (ZHU Y, LIU K, LIU Z, et al. Coupling model for moisture and nitrogen transport on unsaturated slope and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(3): 126-134. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2020. 03. 016.
- [23] ZINGALES F, MARANI A, RINALDO A, et al. A conceptual model of unit-mass response functions for nonpoint source pollutant runoff[J]. Ecological Modelling, 1984, 26(3/4): 285-311. DOI: 10. 1016/0304-3800(84)90073-5
- [24] 李颖, 王康, 周祖昊. 基于 SWAT 模型的东北水稻灌区水文及面源污染过程模拟[J]. 农业工程学报, 2014(7): 42-53. (LI Y, WANG K, ZHOU Z H. Simulation of drainage and agricultural non-point source pollutions transport processes in paddy irrigation district in northeast China using SWAT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014(7): 42-53. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 07. 006.
- [25] 翟晓燕. 变化环境下流域环境水文过程及其数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2015. (ZHAI X Y. Numerical simulation on watershed environmental hydrological processes in a changing environment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese))
- [26] 张荣标, 刘骏, 张磊, 等. EC-5 土壤水分传感器温度影响机理及补偿方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 168-172. (ZHANG R B, LIU J, ZHANG L, et al. Temperature effect mechanism and compensation method of EC-5 soil moisture sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 168-172. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. Issn. 1000-1298. 2010. 09. 034.
- [27] MORBIDELLI R, CORRADINI C, SALTALIPPI C, et al. Initial soil water content as input to field-scale infiltration and surface runoff models[J]. Water Resources Management, 2012, 26(7): 1793-1807. DOI: 10. 1007/s11269-012-9986-3.
- [28] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报, 2008(8): 1571-1578. (WANG H, WANG Q J, SHAO M A. Effect of antecedent soil moisture on nitrate and phosphorous loss from loess slope land and

- determination of optimal moisture values [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008(8): 1571-1578. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2008. 08. 001.
- [29] LIU R M, WANG J W, SHI J H, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 1069-1077. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2013. 09. 035.
- [30] SCIENTIFIC J. TableCurve 2D. Automated curve fitting and equation discovery; Version 4. 0[M]. San Rafael, CA: Jandel Scientific, 1996.
- [31] 俞跃, 宋玉梅, 唐文浩. 模拟降雨条件下万泉河流域农田养分流失特征及面源污染源强研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(17): 9158-9160, 9189. (YU Y, SONG Y M, TANG W H. Research on nutrient loss features of farmland and strong surface source pollution in Wanquan River valley under simulated rainfall condition[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(17): 9158-9160, 9189. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j. cnki. 0517-6611. 2010. 17. 059.

Experiment on nitrate-N pollutant generation process driven by nonlinear rainfall-runoff

WANG Longfeng¹, XIA Jun^{2,5}, YU Jingjie^{2,4}, QIAO Yunfeng^{3,4}, SHI Chao⁶, WANG Qiang⁷, ZHAO Yanjun²

(1. *China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China*; 2. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 3. *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 5. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 6. *Agricultural and rural Bureau of Haishu District, Ningbo, Ningbo 315000, China*; 7. *Power China Zhongnan Engineering Corporation Ltd., Changsha 410014, China*)

Abstract: The special topography and soil characteristics of the hilly slopes in southern China make the hydrological process that drives the nitrate-N transport showing highly non-linear. Thus, the study of slope nitrate-N loss process varying with time associated with nonlinear rainfall-runoff is very important. The rainfall and antecedent soil moisture are the significant factors influencing the natural runoff process and non-point source pollution loss. Most scholars consider the pollutant generation coefficient as a constant for the sake of simplicity, and it lacks the detailed quantitative description and mechanism study.

An artificial simulation rainfall-runoff-pollutant generation experiment equipment close to natural rainfall with a high degree of automation observation was developed. The designed contrast control experimental method was employed to study the runoff generation and nitrate-N generation process near the surface soil under different rainfall intensity and antecedent soil moisture. The mathematical derivation method was used to discuss the relationship between the nitrate-N generation coefficient, runoff, and soil moisture near the surface soil.

The runoff generation escalated with time in a power function form initially and then keeps stability later. The larger the rainfall intensity and the higher the antecedent soil moisture, the runoff-yielding time was faster, the runoff generation and the cumulative runoff generation were larger, the time for the runoff stabilization was shorter, and the runoff stabilization value was higher. The nitrate-N load and cumulative nitrate-N load were higher at the beginning of the rainfall. It showed decreasing trend in a power function form, and finally became stable along with the runoff. With the increase of the rainfall intensity and antecedent soil moisture content, the nitrate-N load and cumulative nitrate-N load increased, and the time for the nitrate-N load stabilization was shorter.

The two parameters relationship formula between the nitrate-N generation coefficient and the soil moisture driven by the nonlinear rainfall-runoff could better describe the nitrate-N generation process near the surface soil. The rainfall-runoff plays a decisive role for the nitrate-N generation coefficient, and it has an exponential function relationship with the soil moisture under the nonlinear rainfall-runoff condition. The discussed relationship between the rainfall-runoff, the nitrate-N generation coefficient, and the soil moisture could provide a certain reference value for simulating the nitrate-N generation coefficient process near the surface soil driven by the nonlinear rainfall-runoff with high time resolution.

Key words: soil box; slope; nitrate-N; rainfall-runoff-pollutant generation experiment; pollutant generation process