

薛鹏程, 庞燕, 项颂, 等. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1362-1368.

XUE Peng-cheng, PANG Yan, XIANG Song, et al. Nitrogen loss characteristics of farmland runoff under simulated precipitation conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1362-1368.

模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究

薛鹏程^{1,2}, 庞燕^{1*}, 项颂¹, 胡小贞¹, 王欣泽³

(1.中国环境科学研究院, 北京 100012; 2.苏州科技大学, 江苏 苏州 215009; 3.上海交通大学, 上海 200240)

摘要:基于洱海流域农田径流总氮污染严重、入湖总氮负荷较高的特点,采用室外人工模拟降雨方法,研究了20、40、60 mm·h⁻¹三种雨强条件下农田径流产流过程和氮素流失特征。结果表明:农田径流的产生主要受降雨量控制,当雨量达到(20±2) mm时才会产生径流,雨强主要影响其产流后流量的增长速度以及稳流后流量的大小,雨强越大,产流增长速度越快,平稳后径流量也越大;径流中氮素流失量与降雨量呈极显著线性相关($P<0.01$),而且雨强越大,氮素流失速度越快,雨强60 mm·h⁻¹时线性拟合方程的斜率最大为1.28;三种雨强条件下均无明显的初期冲刷效应,不宜通过截留初期农田径流来控制农田径流氮污染;径流中氮素浓度随着降雨量增加先增大后减小,其浓度峰值受雨强影响较大,雨强大的浓度峰值高,且浓度峰值均出现在径流量趋于稳定时段附近;氮素浓度变化与悬浮物浓度变化呈极显著线性相关。建议通过加强水土流失管控及在湖周采取截蓄净化等措施有效控制洱海流域农田径流中的氮污染。

关键词:模拟降雨;农田径流;雨强;氮素

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1362-07 doi:10.11654/jaes.2017-0382

Nitrogen loss characteristics of farmland runoff under simulated precipitation conditions

XUE Peng-cheng^{1,2}, PANG Yan^{1*}, XIANG Song¹, HU Xiao-zhen¹, WANG Xin-ze³

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3.Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Farmland runoff in the Lake Erhai Basin is characterized with a high concentration of total nitrogen, which produces a high input load of total nitrogen into Lake Erhai. Outdoor simulated precipitation experiments were carried out to study the farmland runoff process and nitrogen loss characteristics under the rainfall intensities of 20, 40 and 60 mm·h⁻¹. The results indicated that the farmland runoff was mainly affected by the amount of rainfall. At a rainfall amount of (20±2) mm or more, farmland runoff appeared. Rainfall intensity had a significant effect on the rate of increase in runoff volume at the generation and stabilization stages. The volume and rate of increment increased with rainfall intensity. A significant linear correlation ($P<0.01$) was observed between the nitrogen loss and the amount of rainfall. Moreover, the rate of nitrogen loss increased with an increase in rainfall intensity. The maximum slope of the linear regression function between nitrogen loss and the amount of precipitation was 1.28 at the intensity of 60 mm·h⁻¹. The first flush effect of the nitrogen loss from the farmland runoff was not obvious at the three modelled rainfall intensities; therefore, intercepting the initial farmland runoff was not a suitable method for controlling the nitrogen pollution. The nitrogen concentration in the farmland runoff initially increased, and then decreased with the increase in rainfall amount. The peak concentration was greatly affected by the rainfall intensity, i.e., the stronger the intensity, the higher was the peak concentration. The concentration peak of total nitrogen appeared when the runoff approached the stabilization stage. A significant linear correlation was observed between the total nitrogen concentration and the suspended solid concentration in the runoff. These results suggest that the effective methods of controlling nitrogen pollution from farmland runoff in Lake Erhai basin include prevention of soil erosion, interception, and purification of the farmland runoff around the lake.

Keywords: simulated precipitation; farmland runoff; rainfall intensity; nitrogen

收稿日期:2017-03-16

作者简介:薛鹏程(1991—),男,硕士,主要研究方向为水污染控制技术与理论。E-mail:15262408591@163.com

*通信作者:庞燕 E-mail:190068749@qq.com

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-003-03)

Project supported: The National Water Pollution Control and Management Technology Major Project of China(2012ZX07105-003-03)

农田径流污染是指在雨水的淋溶和冲刷作用下,大气沉降物以及农田里各种污染物质随径流进入水体环境造成的污染^[1]。它是农业面源污染的主要来源^[2-3],也是引起水体富营养化的原因之一^[4-5]。近年来,越来越多的学者投入到农田径流污染研究中,尤其对农田径流中氮素流失研究开展了大量工作。美国环保局^[6]研究得出农田径流污染对水资源污染的贡献率接近50%,更是河流氮的主要来源(占70%);白献宇等^[7]研究表明洱海流域农田径流总氮产生量为 $604 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占流域低污染水总氮产生量的45.6%;焦平金^[8]对淮河流域的调查发现,该流域农田径流氮入河量达 $18.3 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$,占流域总入河氮污染的47.5%。可见,农田径流中氮素流失对湖泊水体影响较大,掌握农田径流氮素流失特征和制定合理的控制措施对控制湖泊污染以及防治湖泊富营养化具有重要意义。

洱海是云南省第二大淡水湖泊,是大理市主要的饮用水源地和国家级自然保护区,也是大理州社会经济可持续发展的基础^[9]。近年来,人类活动的不断加剧使得洱海面临巨大压力,湖泊已处于富营养化初期阶段,而氮是湖泊富营养化的主要限制因子之一^[10-12]。洱海流域作为典型的农业流域,稻田种植面积大,占整个流域总面积的10%左右,主要位于流域北部、西部和南部的坝区,稻田施用的农药化肥在降雨冲刷下进入农田径流,成为威胁洱海水质的主要污染源。虽然目前针对洱海流域的农田氮素流失问题已开展了大量研究^[13-15],但研究主要侧重于轮作方式、氮肥施用等人为因素对农田土壤氮素流失的影响及控制技术,而关于自然因素如不同雨强对农田径流氮素流失特征的研究则较少。

该研究基于以上研究背景,开展人工模拟降雨试验,分析三种常见雨强条件下洱海稻田土径流氮素输出过程、流失特征及浓度变化规律,为有效控制流域降雨产生的农田径流氮素的人湖负荷,减少其对洱海的污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海流域属澜沧江-湄公河水系。流域面积 2565 km^2 ,湖面面积 252 km^2 。流域气候属典型的高原大陆性气候,干湿季分明,5—10月为雨季,多年年均温度和降雨量分别为 $15.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 1048 mm 。流域内的地带性土壤为红壤,此外还分布有黄红壤、黄棕壤、暗棕壤、高山草甸土和水稻土等。洱海流域是我国重要的农业

生产基地,也是大理州农业生产集约化程度相对较高的区域。

研究区位于洱海流域西区(图1),受地理气候特征影响,降雨主要发生在5—10月,降水量占全年降水量的88.7%,年内降水高峰月出现在7—8月(图2)。降雨量分布存在较大的时空差异,实测最大年降水量为 2145.4 mm (苍山站1992年),最小为 370.5 mm (银桥站2003年),多年最大月降雨量为 356 mm (1999年8月),雨季月均降雨量为 147.85 mm ,多年平均日降雨量为 2.97 mm ,雨季日均降雨量为 4.98 mm ;洱海西区是流域内降水最多的区域,多年年均降雨量为 1183.1 mm ,其次为洱海湖区,流域北部和洱海东区降雨相对少,均小于 800 mm 。尤其在7—8月份降雨高峰期,研究区暴雨多发(图3),24 h降水超过 50 mm 的强降雨时有发生,由此引起的农田营养盐流失对洱海水质影响较大。

1.2 装置和材料

模拟降雨试验装置主要由 Full jet 降雨喷头(美国 Spaying System 公司)、支架、土槽柜、雨量筒、供水罐、

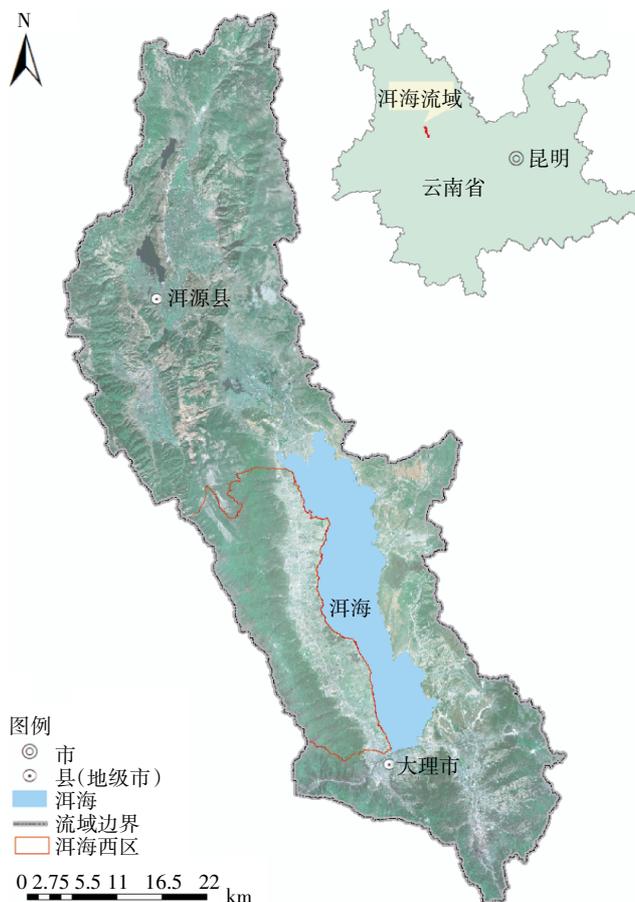


图1 研究区位置

Figure 1 The location of study area

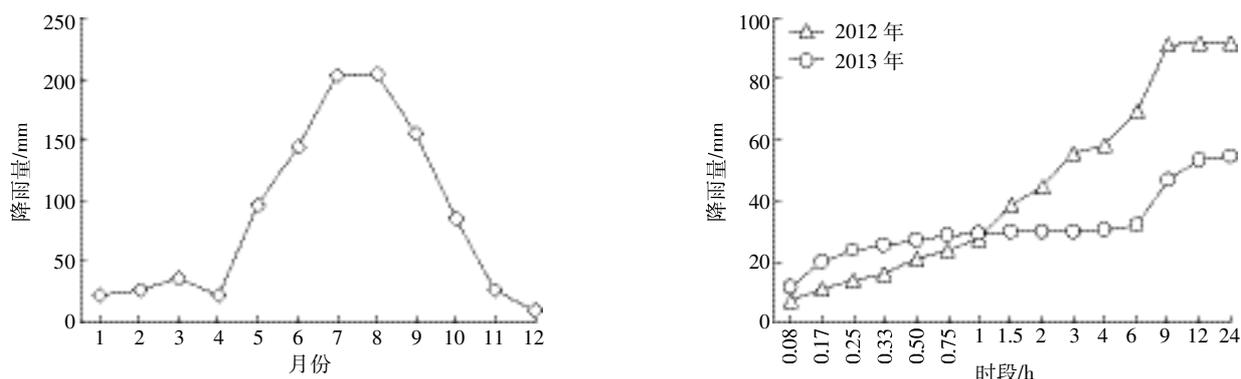


图2 洱海流域多年降雨量特征

Figure 2 Characteristic of annual precipitation for years in the Lake Erhai basin

输水管以及自动控制柜组成。共设四组降雨喷头,每组由三种不同大小的喷头组成,降雨区域达 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$,雨强在 $10\sim 100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内连续可调。土槽柜为钢板结构的正方形,内正方形边长和挡板高分别为 1 m 和 10 cm ,外正方形边长和挡板高分别为 1.2 m 和 30 cm ;间隙凹槽用于收集产生的径流,凹槽四边分别设有一个直径 25 mm 的孔并连接导流管接入采样瓶中。每次实验结束后需将土槽柜里的土壤及时清理干净,待土槽柜内晒干后方可装入土样进行下一次实验。

供试土壤取自洱海流域西区的稻田土,按每层 30 cm 挖取,除去碎石块、植物根茎等杂质,过 5 mm 孔筛网,经风干、均匀混合等处理后均匀填充于试验装置土槽柜中,上部呈垄状,顶部高度 30 cm ,最大限度模拟土壤自然状态。为保证降雨前土壤的含水量一致,降雨实验前需测定土壤含水量。稻田土前期含水量控制在 27.6% ,土壤容重为 $1.11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质含量为 $62.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $2.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷为 $0.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤速效磷为 $41.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为 5.39 。

1.3 试验设计

2015年4月至6月,选择洱海西区的稻田土开展模拟降雨试验,降雨采用人工模拟系统,降雨高度 2 m ,降雨均匀系数大于 85% ,降雨特性接近于天然降雨。

根据1.1节当地降雨资料中降雨强度水平,结合研究目的,设计 20 、 40 、 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 三种降雨强度进行降雨模拟,降雨量均控制为 180 mm ,每组雨强设计两组平行试验。每次模拟试验采样频率采取前密后疏的方法,径流产生后每 60 mm 的降雨量为一个采样时段,前 60 mm 的降雨量内每产生 10 mm 降雨量采集一次径流样品,中间 $60\sim 120\text{ mm}$ 的降雨量内每 20

mm 采样一次,后 60 mm 降雨量内每 30 mm 采样一次。径流水样收集于干净的塑料桶内并充分搅拌后,装于 500 mL 的塑料瓶待测。

1.4 分析方法

按照《水和废水监测分析方法(第四版)》进行水样测定,径流中悬浮物采用重量法测定,氮素浓度采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定^[16]。

径流量用体积法测定,主要是通过采集样品的同时用秒表进行计时,根据秒表记录的时间以及取器器读出的体积计算出该时刻的径流量。

氮素初期冲刷效应判断方法采用国内外学者普遍认可的 $M(V)^{[17-18]}$ 曲线法和 $FF_{20/40}$ 法^[19]。其中降雨径流累积排放率是指一次降雨过程中,径流量随时间的累积量与径流总量的比值,计算公式如公式(1);污染物累积负荷率是指一次降雨过程中,污染物随时间的累积量与污染物总量的比值,计算公式如公式(2):

$$P_Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_L = \frac{L_i}{L} \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i \times \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i \times \Delta t_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_Q 为降雨径流累积比例,%; P_L 为污染物负荷累积比例,%; L_i 和 L 分别为第 i 个和全部径流样品携带的污染物负荷, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; C_i 为第 i 个样品的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q_i 为 Δt_i 内径流量, $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; Δt_i 为第 i 个样品间隔时间, min ; n 为样品个数。

数据采用 Origin 2015 和 SPSS 19 软件进行处理

分析。

2 结果与讨论

2.1 产流过程

农田氮素径流流失与降雨产流过程密切相关,降雨形成的径流是农田土壤氮素流失的溶剂和载体^[20-22]。三种降雨强度下农田径流产流过程如图3所示,可以看出,三种雨强下的径流曲线均为单峰型,径流发生时间主要受降雨量控制,但径流产量和流量峰值存在较大差异。

降雨初始,土壤含水量较低,大部分降雨入渗到下层土壤,无地表径流产生^[23];随着降雨累积量增加至 (20 ± 2) mm时,足够的降雨量使土壤下渗剖面蓄满径流,含水率达到饱和,径流才开始产生,陈玲等^[24]的研究也有类似结论。产流发生后,农田径流量变化可分为两个阶段:第一阶段降雨量为 (20 ± 2) mm至 (65 ± 2) mm时,三种雨强下径流产流量随降雨量的增加均大幅升高,主要是由于径流产流发生后,随降雨量持续增加土壤含水率逐渐饱和,导致土壤入渗率不断下降,因此地表径流量持续升高;在雨强为 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,径流产量随降雨量变化的曲线斜率最大,表明在此阶段,雨强越大,径流产量越高,这与高雨强对土壤颗粒强冲击作用有关。第二阶段为降雨量高于 65 mm 时,三种雨强下径流产流曲线均随降雨量增加先缓慢升高至降雨量 (120 ± 2) mm左右,地表达达到水土两相饱和时产流达到峰值;雨强为 20 、 40 、 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时径流量分别为 (4.6 ± 0.2) 、 (10 ± 2) 、 $(15\pm 0.3)\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,可以看出雨强越大产流峰值越高,这与屈丽琴等^[25]研究室内小流域降雨产流过程试验结论相一致,主要是因为雨强越大对地表颗粒的冲击作用越强,径流汇集速度越快。鉴于研究区传统农业集约程度高,雨季降雨多发期降雨量大,降雨形成的径流会导致农田土壤氮素流失,影响周边水体水质^[26-27],应重点作好降雨量 (20 ± 2) mm至 (65 ± 2) mm时的径流截蓄调控。

2.2 氮素流失量变化过程

三种降雨强度下氮素流失量变化过程如图4所示,可以看出三种雨强下农田氮素累积流失量随降雨量增加呈极显著线性增长 $(P<0.01)$ 。可见,降雨量是影响氮素流失变化过程的重要因素,随着降雨量增加,农田径流携带的氮素也增多,主要是由于随降雨持续,径流产流量增加,更多的氮素随径流流失。此外,三种雨强下农田氮素累积流失量与降雨量的拟合方程的斜率 k 值存在较大差异,雨强为 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时

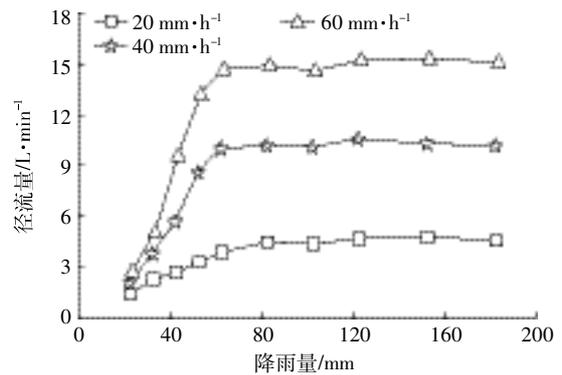


图3 不同雨强条件下径流量变化过程

Figure 3 Variation of runoff discharge under different rainfall intensities

k 值最大为1.28,雨强为 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时 k 值为1.14,而雨强为 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时 k 值最小为0.85,也即雨强越大氮素的径流流失量越多,这主要是由于雨强越大,雨滴对地表的撞击作用越大,土粒被冲刷进入径流的速度越快,而入渗的速率更慢,因此径流中氮素流失量越多。与该研究结果一致,潘忠成等^[28]采用人工降雨模拟4种雨强下粘质土坡面径流氮素流失过程,也发现粘质土坡面径流氮素流失量随雨强增大而增加。因此,在进行研究区农田径流污染控制时应考虑降雨量和雨强的双重因素,合理选用综合控制技术,作好农田径流排水的集蓄、截污与再利用,并加强农田作物种植水肥管理。

2.3 氮素浓度变化规律

2.3.1 氮素浓度变化过程

三种雨强条件下氮素浓度变化过程如图5所示,不同雨强下,径流中氮素浓度变化趋势较为一致,但浓度峰值存在差异。

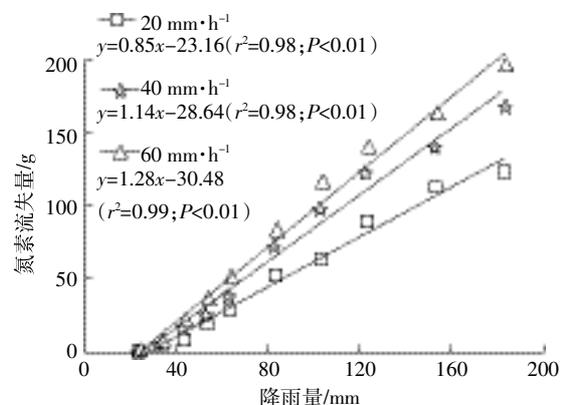


图4 不同雨强条件下氮素流失量变化拟合过程

Figure 4 Fitted process of the nitrogen loss under different rainfall intensities

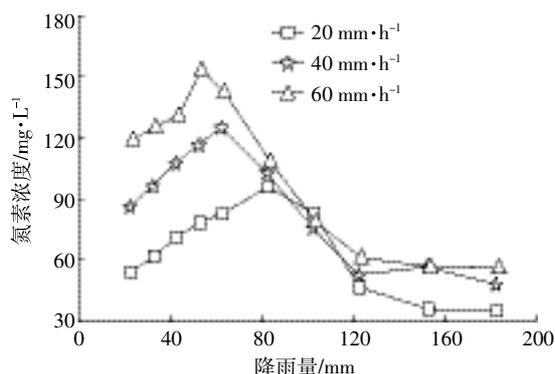


图5 不同雨强条件下氮素浓度变化过程

Figure 5 Variation of nitrogen concentration under different rainfall intensities

20、40、60 mm·h⁻¹ 三种雨强条件下,起始径流中氮素浓度分别为 55、85、118 mg·L⁻¹;后随降雨量的增加,径流中氮素浓度先升高,至峰值 92、122、152 mg·L⁻¹ 后快速下降并趋于平缓。可解释为降雨事件发生初期,径流产流量较小,故携带的氮素少,浓度相对低,但随着降雨增加,径流量持续增加,其携带氮素的能力变强,故径流中氮素浓度逐渐升高,至(60±2)mm 降雨量时氮素浓度达到峰值;雨强在 60 mm·h⁻¹ 条件下,降雨量达(60±2)mm 时氮素浓度峰值最高为 155 mg·L⁻¹,且峰值出现的时间略早于 20 mm·h⁻¹ 和 40 mm·h⁻¹ 雨强,这主要是受大雨强强冲刷能力的影响。此后随着降雨持续,土壤表层的氮素含量减少,能携带的氮素越来越少,加之径流量持续增加,故氮素浓度迅速降低,至径流量趋于稳定时段附近(125±2)mm 时,氮素浓度降至 60 mg·L⁻¹,与图 5 降雨量(65±2)mm 至(120±2)mm 时氮素浓度曲线变化一致;后期以表层径流输出为主,氮素浓度基本稳定。这与陈玲等^[24]在不同雨强下坡耕地氮素径流输出的研究结论基本一致,此研究也表明,不同雨强下地表径流中氮素浓度在初期较高,之后随降雨量的持续增加迅速减小并逐步趋于稳定。由此可知,研究区农田径流中氮素浓度控制与径流量密切相关,应重点对降雨量(20±2)mm 至(65±2)mm 这一径流高产时段加强污染控制;此外在进行径流控制技术选取时还应综合考虑雨强的影响,着重加强大雨强下径流污染防范。

2.3.2 氮素与悬浮物浓度变化关系

20、40、60 mm·h⁻¹ 三种雨强条件下,氮素浓度随悬浮物(SS)浓度的增加而升高(图 6)。雨强越大,以 SS 为载体的氮素迁移能力越强,氮素浓度越高。

图 6 中氮素浓度与 SS 浓度呈正线性关系,且线性拟合方程 $P < 0.01$,即随着 SS 浓度的增加,氮素浓

度呈线性增长,两者呈极显著线性相关,表明 SS 是影响氮素浓度变化的重要因素。此外雨强为 60 mm·h⁻¹ 时,拟合方程 r^2 值最大为 0.96,雨强为 40 mm·h⁻¹ 时,拟合方程 r^2 值为 0.89,雨强为 20 mm·h⁻¹ 时,拟合方程 r^2 值最小为 0.82,也即雨强越大方程的拟合效果越好,表明雨强也是控制氮素浓度污染的重要因素,雨强越大对地表的冲刷强度越大,以 SS 为载体迁移氮素的能力越强^[29]。由此可见,SS 是农田径流中氮素迁移的重要载体,可以通过有效控制径流中 SS 的量来控制径流中氮素浓度,除加强农田周边区域的日常水土流失管控外,还可在洱海周边设置湖滨缓冲带、人工湿地、生态拦截型沟渠、前置库进行径流污染物截蓄净化,从而控制农田径流氮素污染^[30]。此外,鉴于悬浮物对氮素流失影响较大,后续将深入开展不同形态的氮素随农田径流 SS 的流失规律研究。

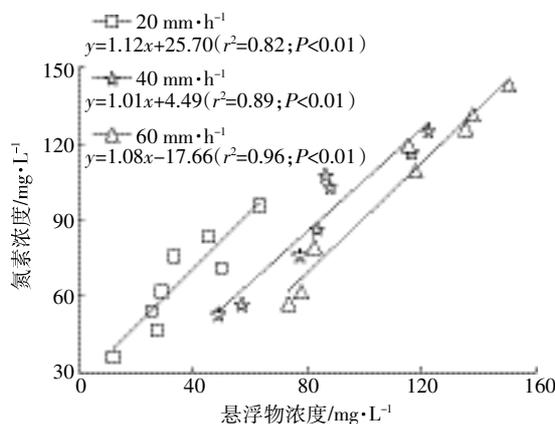


图6 不同雨强条件下氮素与悬浮物浓度变化拟合过程

Figure 6 Fitted process of nitrogen and suspended solid concentration under different rainfall intensities

2.4 氮素初期冲刷效应

20、40、60 mm·h⁻¹ 三种雨强条件下,氮素累积负荷率随累积径流排放率的变化情况如图 7 所示,采用国内外学者普遍认可的 M(V)^[17-18]曲线法和 FF_{20/40}法^[9]对三种降雨条件下农田径流氮素是否发生初期冲刷效应进行分析判断,结果表明,三种雨强下径流中氮素并不都存在初期冲刷效应。

采用 M(V)曲线法^[17-18]来判断氮素初期冲刷效应,当 M(V)曲线全部位于 45°判别线上方时,说明发生了初期冲刷效应。从图 7 可以看出,雨强为 20 mm·h⁻¹ 时氮素累积负荷率随径流排放率的变化曲线并未完全处于 45°判别线上方,表明不存在初期冲刷效应,而雨强为 40 mm·h⁻¹ 和 60 mm·h⁻¹ 时曲线位于 45°判别线上方并略有偏离,表明存在较弱的初期冲刷效应。

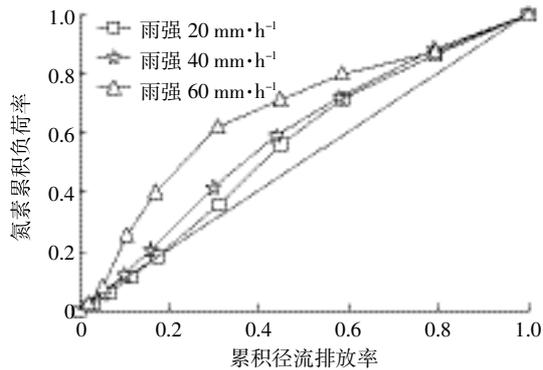


图7 农田径流氮素初期冲刷效应分析

Figure 7 The analysis of initial total nitrogen washing in farmland runoff

根据 $FF_{20/40}$ 法^[19]判断初期冲刷效应,即前20%径流量携带的污染物质如果大于40%,就说明发生了初期冲刷效应。结果表明,雨强为 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,前20%的径流量几乎未携带氮素污染负荷;雨强为 $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,前20%的径流量携带的氮素污染负荷为22%,远低于40%,无初期冲刷效应发生;雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,前20%的径流量携带的氮素污染负荷约42%,略高于40%,径流中氮素均存在较弱的初期冲刷效应。这是因为该次模拟实验的汇水区域较小,在大雨强的情况下形成的初期冲刷效应较弱,其与人工湿地、生态库塘等人工生态系统类型的径流初期冲刷效应不同^[30-31],主要是由于农田属于自然透水下垫面,透水性相对好,部分污染物在降雨初期会下渗到土壤中,使得初期农田径流中污染物相对分散,径流污染物输出过程相对平稳。此外,考虑到实际中农田的汇水面积较大,初期冲刷效应可能更不明显,加之研究区发生大雨强的降雨事件概率较小,故不宜通过常规初期径流控制措施来控制农田径流氮素污染,宜考虑生态拦截沟渠、前置库、人工湿地等生态控制技术。

3 结论

(1)降雨量是影响农田径流产生的重要因素,降雨量达到 $(20\pm 2)\text{ mm}$ 时开始产生径流。雨强影响产流速度和径流量,雨强越大产流速度越快,径流量也越大,在产流平稳阶段,雨强 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的径流量分别为 (4.6 ± 0.2) 、 $(15\pm 0.3)\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

(2)农田径流中氮素流失量与降雨量呈极显著线性正相关 ($P<0.01$),而氮素流失速度受雨强影响。雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,农田径流氮素流失量与降雨量的拟合方程 r^2 最大为 0.986,雨强为 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,拟合

方程 r^2 最小为 0.984。

(3)三种雨强条件下农田径流氮素浓度均随着降雨量先升高后降低,降雨量为 60 mm 时,雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 条件下径流中氮素浓度峰值出现,且总氮浓度峰值最高为 $155 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氮素浓度变化与 SS 浓度变化呈极显著线性相关 ($P<0.01$),雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,以 SS 为载体迁移的氮素能力最强。

(4)径流中氮素并不都存在于雨水初期冲刷效应, $M(V)$ 曲线表明雨强为 $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时农田径流氮素存在较弱初期冲刷效应;而 $F_{20/40}$ 法则表明仅在雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,径流中氮素存在较弱的初期冲刷效应,前20%的径流量携带的氮素量仅占总径流量的42%。

参考文献:

- [1] Hou X K, Zhou F, Leip A, et al. Spatial patterns of nitrogen runoff from Chinese paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231:246-254.
- [2] Liu R, Wang J, Shi J, 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.
- [3] Wang J, Lü G, Guo X, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1):93-106.
- [4] Han J G, Li Z B, Li P, et al. Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5):757-762.
- [5] Wry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2):879-887.
- [6] US Environmental Protection Agency. National management measures to control nonpoint source pollution from agriculture[M]. Washington: Createspace, 2015:128-132.
- [7] 白献宇,胡小贞,庞燕.洱河流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2):200-207.
BAI Xian-yu, HU Xiao-zhen, PANG Yan. Pollution load, distribution
sLake Sci, 2015, 27(2):200-207.
- [8] 焦平金.淮北平原农田地表径流氮磷流失规律及其模拟研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013:21-41.
JIAO Ping-jin. Evaluation of nitrogen and phosphorus losses by surface runoff with experiment and simulation in Huaibei Plain[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013:21-41.
- [9] 倪兆奎,王圣瑞,赵海超,等.洱海入湖河流水体悬浮颗粒物有机碳氮来源特征[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(3):287-293.
NI Zhao-kui, WANG Sheng-rui, ZHAO Hai-chao, et al. The sources of organic carbon and nitrogen of suspended particulate matter in inflow

- river of Erhai Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(3):287-293.
- [10] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(3):235-242.
ZHAO Hai-chao, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of the nitrogen forms in the sediments of Erhai Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(3):235-242.
- [11] 张红叶, 蔡庆华, 唐涛, 等. 洱海流域湖泊生态系统健康综合评价与比较[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(4):715-720.
ZHANG Hong-ye, CAI Qing-hua, TANG Tao, et al. Comprehensive assessment and comparison of lakes' ecosystem health in Erhai Watershed[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4):715-720.
- [12] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 等. 云南洱海的生态保护及可持续利用对策[J]. *环境科学*, 2005, 26(5):38-42.
YAN Chang-zhou, JIN Xiang-can, ZHAO Jing-zhu, et al. Ecological protection and sustainable utilization of Erhai Lake, Yunnan[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(5):38-42.
- [13] 施泽宇, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4):838-846.
SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the Northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):838-846.
- [14] 汤秋香, 刘宏斌, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区环境友好型种植模式筛选[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(12):2375-2383.
TANG Qiu-xiang, LIU Hong-bin, LEI Bao-kun, et al. Screening of environment-friendly cropping mode in the Northern region of Erhai Lake[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(12):2375-2383.
- [15] 王哲, 谢杰, 方达, 等. 洱海北部2种典型种植制度下农田氮污染负荷研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5):625-629.
WANG Zhe, XIE Jie, FANG Da, et al. Nitrogen pollution load in farmlands under two typical farming systems in the North of Lake Erhai region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5):625-629.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] Sansalone J J, Cristina C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 130(11):1301-1314.
- [18] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. *Water Research*, 2000, 34(6):1773-1780.
- [19] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. *Water research*, 1998, 32(8):2462-2470.
- [20] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1/2):178-185.
- [21] Zhou Q Y, Shimada J, Sato A. Temporal variations of the three-dimensional rainfall infiltration process in heterogeneous soil[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4). doi:10.1029/2001WR000349.
- [22] 聂小飞, 李恒鹏, 黄群彬, 等. 天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(6):827-835.
NIE Xiao-fei, LI Heng-peng, HUANG Qun-bin, et al. Characteristics of nitrogen loss via runoff from typical land uses in hilly area of Tianmuhu Reservoir watershed[J]. *J Lake Sci*, 2013, 25(6):827-835.
- [23] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(8):1763-1769.
YANG Li-xia, YANG Gui-shan, YUAN Shao-feng, et al. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8):1763-1769.
- [24] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(6):2151-2158.
CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6):2151-2158.
- [25] 屈丽琴, 雷廷武, 赵军, 等. 室内小流域降雨产流过程试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12):25-30.
QU Li-qin, LEI Ting-wu, ZHAO Jun, et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12):25-30.
- [26] Zhao Q H, Li D Q, Zhuo M N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2014, 29(2):1-13.
- [27] Pooley T. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(3):846-854.
- [28] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):9-13.
PAN Zhong-cheng, YUAN Xi, LI Min. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):9-13.
- [29] 王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 等. 重庆市典型城镇区地表径流污染特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(8):2809-2816.
WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, et al. Pollution characteristics of surface runoff of typical town in Chongqing City[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8):2809-2816.
- [30] 聂小飞, 李恒鹏, 李新艳. 巢湖典型子流域上下游水塘对暴雨径流氮磷去除效率比较[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(1):89-95.
NIE Xiao-fei, LI Heng-peng, LI Xin-yan. Comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiencies by storm runoffs for the ponds in the upper and lower reaches of a typical sub-catchment in Lake Chaohu drainage basin[J]. *J Lake Sci*, 2012, 24(1):89-95.
- [31] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 塘堰湿地减少农田面源污染的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4):130-134.
PAN Le, MAO Zhi, DONG Bin, et al. Experimental research on reduction of agricultural non-point source pollution using pond wetland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4):130-134.