

紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征

蒋 锐^{1,2}, 朱 波², 唐家良², 罗专溪², 王 冬¹, 辛 伟¹, 魏世强¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:对 2007 年盐亭小流域两场典型降雨(施肥后首场大雨和大暴雨)的径流过程进行了连续监测,同步测定了径流量、氮磷浓度,旨在阐明农业小流域典型降雨氮磷流失随降雨径流的变异规律。结果表明,流量曲线与浓度过程线变化趋势一致。整个径流过程中的氨态氮(AN)与磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)浓度较低且波动较小。初期径流颗粒态氮(PN)、颗粒态磷(PP)与总磷(TP)的浓度高于后期径流,初期冲刷效应明显。颗粒态氮(PN)是氮素在径流初期迁移的主要形态,而后期以硝态氮(NN)为主;但 PP 是整个径流过程中的主要迁移形态。初期径流中 AN、PN、TP、PP 及泥沙(SS)负荷分布较大,而硝态氮(NN)、总氮(TN)和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则主要分布在径流后期。污染物初期冲刷和 NN 后期淋溶是暴雨径流氮素流失的主要原因,而施肥后首场降雨氮素流失的主要原因是 NN 淋溶。暴雨径流产生氮磷负荷巨大,TN 与 TP 分别为 167.04 kg 和 20.75 kg;而施肥后首场大雨径流氮磷流失负荷较小,分别为 12.07 kg(TN)、1.04 kg(TP),其中 60%的TN 以 NN 流失。

关键词:施肥后首场大雨;大暴雨;非点源污染

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1353-06

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Typical Rainfall-runoff Events in a Small Watershed in Hilly Area of Purple Soil

JIANG Rui^{1,2}, ZHU Bo², TANG Jia-liang², LUO Zhuan-xi², WANG Dong¹, XIN Wei¹, WEI Shi-qiang¹

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment in Chongqing, Chongqing 400716, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China)

Abstract:First heavy rainfall after fertilization and heavy storm were typical rainfall events in hilly area of purple soil, which affected nitrogen and phosphorus losses from agricultural watershed. Rainfall-runoff discharge, pollutant concentrations and loads combined with those two typical rainfall-runoff events were monitored at a small watershed in the central Sichuan Province, China in 2007. The objects of study were to investigate: (1) changes of nitrogen and phosphorus losses with rainfall-runoff; and (2) the effects of rainfall conditions on nitrogen and phosphorous losses. The results showed that changes of the concentrations for nitrogen and phosphorus with time were same to that for rainfall-runoff discharge. The concentrations of ammonium (AN) and phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) in the runoff kept low with small variations during the rainfall process. The concentrations of particulate nitrogen (PN), particulate phosphorus (PP), and total phosphorous (TP) were much higher in the early stage of the rainfall-runoff than those in the later stage, indicating that significant initial wash-out effects of occurred to PN, PP and TP. In initial rainfall-runoff, PN was the main transport form of nitrogen, while nitrate-nitrogen (NN) dominated in the later portion. PP was the main transport form of phosphorus during the whole rainfall-runoff process. The loads of AN, PN, TP, PP, and sediment (SS) were mostly transported by the early portion of rainfall-runoff, and NN, TN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were in the later portion. Transport forms and loads of pollutants were affected by rainfall conditions. Nitrogen losses from storm runoff were influenced by two transport processes with initial wash-out effect and followed by NN leaching, while only by the NN leaching process in heavy rainfall-runoff after fertilization. Nitrogen and phosphorus losses from first heavy rainfall-runoff after fertilization were lower with the loads of 12.07 kg for TN and 1.04 kg for TP, and 60% of TN load was lost as NN from heavy rainfall-runoff; while that from storm-runoff were larger with the loads of 167.04 kg for TN and 20.75 kg for TP, which could pose great threats to Yangtse downstream water environment.

Keywords: first heavy rainfall after fertilization; heavy storm; non-point source pollution

收稿日期: 2008-03-28

基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAD87B10); 国家自然科学基金(40571093); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07); 中科院山地所 2007 年青年种子基金

作者简介: 蒋 锐(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事面源污染研究。E-mail: haixia992000@yahoo.com.cn

通讯作者: 魏世强 E-mail: sqwei@swu.edu.cn

农业非点源 N、P 的过度排放对水体的危害日益加剧,非点源污染问题已经引起人们的普遍关注,其中氮磷的排放规律与负荷成为国内外研究的热点并开展了大量的工作,尤其在流域尺度上进行了大量的野外监测、模型模拟及污染控制研究^[1-7]。但这些研究一般探讨不同土地利用下污染物在降雨径流中流失的一般规律,着重研究径流量与污染负荷之间的相关关系。而针对典型的降雨事件,如施肥后首场大雨,大暴雨等事件,其过程研究相对缺乏。典型降雨条件对径流中污染物形态、浓度和负荷的影响并不十分清楚,而降雨径流中污染物负荷的分布特征也尚不明确。紫色丘陵区是四川农业的主体区域,也是西南地区农业的中心。近年来,过量施肥使得农业面源污染日益突出,该区夏季雨量丰富,集中施肥管理与降雨条件的联合作用对氮磷流失影响巨大。另一方面,该区雨季降雨多以暴雨形式出现,汛期暴涨暴落,是农业面源污染的高发期^[8]。因此,查明施肥后首场大雨和大暴雨等典型降雨径流事件中氮磷流失的特征,对于紫色丘陵区非点源污染的防治具有重要的意义。本文拟在紫色丘陵区小流域研究典型降雨径流过程中 N、P 浓度变化与负荷分布,讨论典型降雨条件对氮磷流失的影响,以期对紫色丘陵区农业面源污染的控制提供基础科学依据。

1 实验设计与研究方法

1.1 典型小流域概况

小流域位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡截流村,地理位置 105°27'E, 31°16'N,地处嘉陵江一级支流——涪江支流弥江、湍江的分水岭上,海拔 400~600 m。属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温-5.1℃,无霜期 294 d;多年平均降雨量 826 mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季占 65.5%,秋季占 19.7%,冬季占 8.9%。该流域为紫色土丘陵区的一个缩影,其土地利用模式及小流域农业结构极具代表性。土地总面积 34.64 hm²(图 1),其中林地 12.14 hm²,旱地 15.64 hm²,两季田 2.39 hm²,水田 1.54 hm²,居民地 1.71 hm²,其他用地 1.22 hm²。土壤类型为水稻土和石灰性紫色土,质地为中壤,植被为桉木(*Alder cremastogyne*)和柏木(*Cypresses fineries*)混交林,主要作物有水稻、玉米、小麦、甘薯、油菜等。夏季作物主要是玉米和水稻,玉米 5 月下旬种植,施肥方式为穴施。由于玉米种植面积大,60%以上为坡耕地种植,加上一一次性施肥方式和雨季降雨条件的耦合,玉米季施肥小流域非点源污染物的输出影响较大。该流域 3 面环山,集水区径流汇聚于惟一出口,具有较好的封闭性。

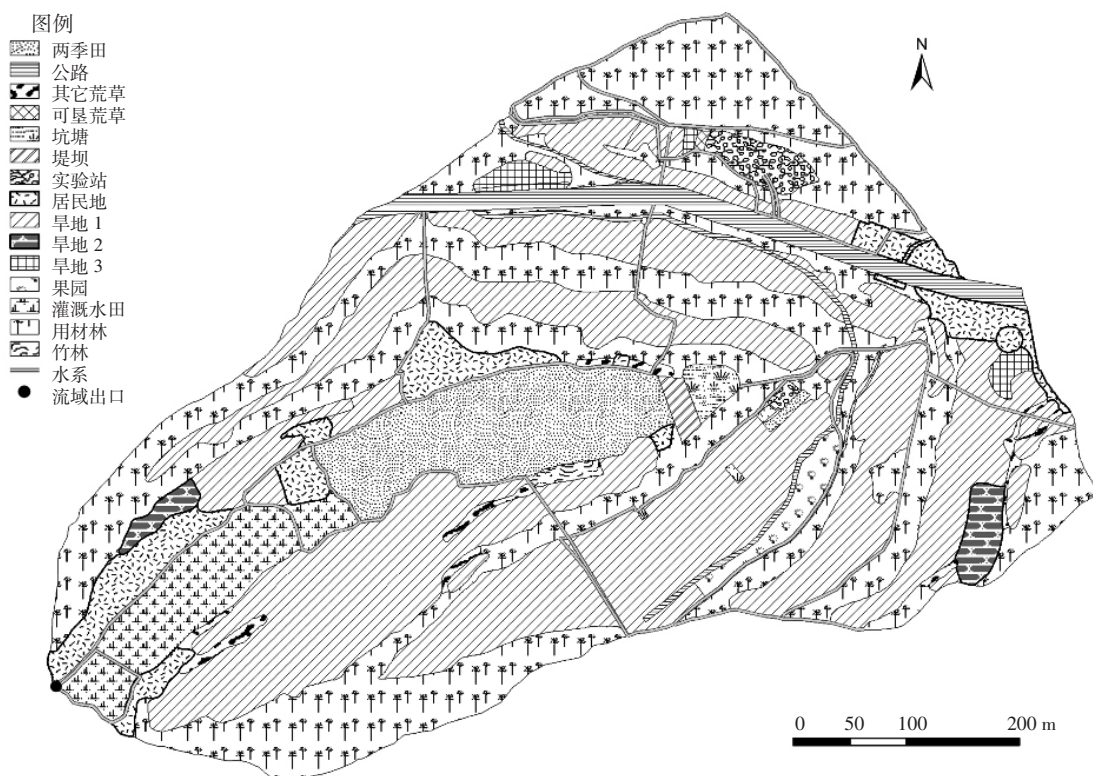


图 1 小流域采样点布置及土地利用
Figure 1 Sampling site and land use of watershed

1.2 降雨和流量变化特征

2007 年盐亭小流域降雨总量为 802.6 mm (图 2a), 6 月—8 月降雨 489.2 mm, 占全年降雨的 61%。全年最大的一次降雨发生在 7 月 16 日, 降雨量 111.7 mm, 最大雨强达 $48 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。小流域全年平均流量 $0.027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2b), 径流受控于降雨特性, 当次降雨量达到 25 mm 时, 才有明显的径流产生。径流季节特征明显, 主要发生在 6 月—8 月, 占全年径流的 75%。其中 7 月平均流量最大, 为 $0.165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 12 月最小, 仅为 $0.0007 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。7 月 16 日暴雨事件中, 日平均流量达 $0.654 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见盐亭小流域降雨和径流量的年内分布极度不均。

1.3 监测现场及分析方法

降雨雨量通过距小流域出口采样点 300 m 处的气象观测站测定, 可实时记录任意时刻的降雨量。为准确观测流域的径流过程和径流量, 在流域出口设有规则直角三角堰(其顶角边长为 1.3 m, 堰的底部和侧面平整、光滑, 不会对水流产生大的影响), 在矩型堰内监测断面设置水位自动监测仪和自动取样器, 可实时记录水位变化和自动取样。现场监测采用仪器与人工相结合。降雨开始后工作人员用分层采样器采水样并装入 500 mL 干净聚乙烯瓶中, 初期采样时间间隔为 10 min, 径流退水段取样间隔为 1 h。流量现场采用直角三角堰法, 根据水位-流量关系曲线可查得实时

流量。

降雨径流结束后立即将样品送回实验室, 样品分为同样的两批, 一批加入 5~6 滴浓硫酸用于测氮, 另一批加入 3~4 滴氯仿用于测磷, 然后放入 4 ℃ 冰箱保存, 48 h 内分析完毕。水样中各污染物的测定方法: 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(GB11894—89)。总磷(TP)用钼酸铵分光光度法测定(GB11893—89)。水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定可溶性总氮(DN)(GB11894—89); 钼酸铵分光光度法测定水溶性磷(DP)(GB11893—89); 紫外分光光度法测定硝态氮(NN)含量(GB/T8538—1995); 纳氏试剂分光光度法测定铵态氮(AN)含量(GB/T8538—1995); 重氮耦合比色法测定亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)含量(GB/T8538—1995); 钼酸铵分光光度法测定磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)含量(GB/T8538—1995)^[9]。颗粒态氮(PN)=TN-DN, 颗粒态磷(PP)=TP-DP。

2 结果

2.1 降雨径流过程 N、P 浓度随流量变化特征

本文选取 2007 年两场不同条件下的降雨为例进行研究, 其降雨条件见表 1。其中 5 月 30 日降雨为夏季玉米种植施肥后首场大雨, 7 月 16 日降雨为全年惟一大暴雨事件。

两次降雨过程降雨量和流量曲线趋势大致相同, 均出现了明显的峰值(图 3a、b 和图 4a、b)。流量峰值均滞后于降雨量峰值, 其滞后时间与土壤前期含水量、降雨量及降雨强度有关^[10]。污染物浓度变化与流量过程线趋势一致, 峰值出现在流量峰值之前, 与文献[3、11]有所差异。AN 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较低且变化较小。PN、TP 和 PP 浓度变化响应流量过程线明显, 均在径流初期迅速达到峰值, 之后陡然下降。初期大量污染物随降雨径流进入水体, 浓度增大出现峰值, 后期由于土壤中污染物含量的下降和流量的持续增大, 流域水体的稀释作用开始占主导地位, 从而导致污染物浓度降低。可见 PN、TP 和 PP 浓度受控于降雨对地表的冲刷。TN 和 NN 浓度变化幅度较大, 且在不同降雨条件下呈现差异。5 月 30 日降雨中(图 3c), TN 与

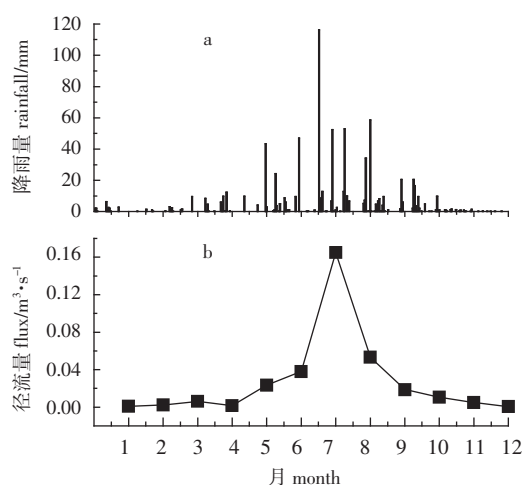


图 2 2007 年日降雨量和月平均流量
Figure 2 Daily rainfall and monthly mean flux in 2007

表 1 降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics

监测日期	降雨量/mm	降雨历时/h	最大雨强/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	平均雨强/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	前期无雨时间/d	降雨条件
2007-05-30	43.4	7	23.4	6.2	6	施肥后首场大雨
2007-07-16	111.7	8.5	48	13.1	3	大暴雨

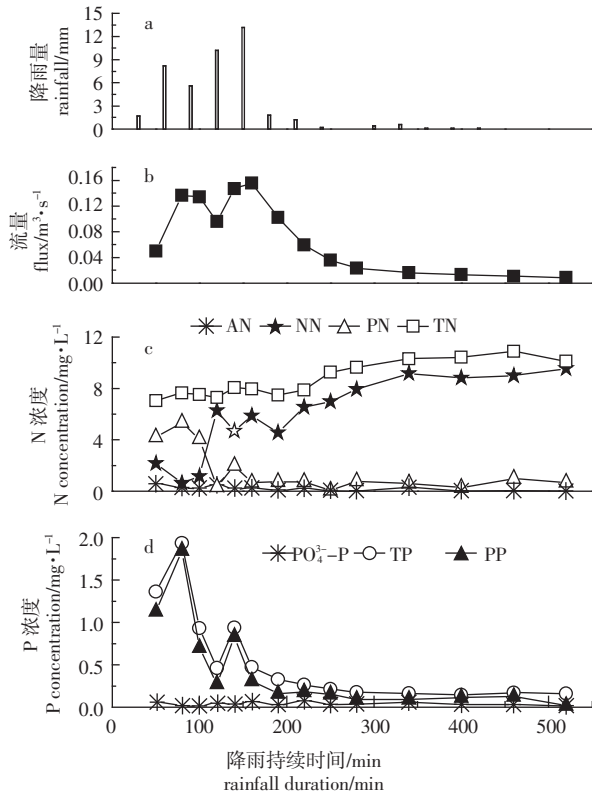


图3 5月30日次降雨径流过程及污染物浓度变化

Figure 3 Changes of rainfall-runoff and pollutants concentration in 30 May, 2007

NN 浓度线趋势大体一致且平缓上升,峰值不明显;7月16日降雨中(图4c),TN 浓度线响应流量过程线强烈,而 NN 浓度变化平缓,径流后期呈上升趋势。可见施肥后首场大雨造成的氮素流失中 NN 占有很大比重,说明施肥与降雨的耦合会明显加剧 NN 的淋失。而暴雨径流中氮素的流失则表现为初期径流以 PN 为主,后期径流以 NN 为主,体现了暴雨冲刷和硝酸盐淋溶两个不同的过程。

2.2 氮磷负荷与径流量分析

两次降雨产生的径流量和氮磷负荷见表2。由表2可知,7月16日整个降雨过程产生径流量23 929.37 m³,TN 与 TP 负荷 167.04、20.75 kg,分别是5月30日降雨的16、14和20倍。说明该小流域大暴雨径流中氮磷排放负荷巨大。5月30日降雨中 NN 负荷为7.41 kg,占 TN 负荷的60%,NN 负荷与 TN 负荷相关性显著($r=0.613, P<0.05$),说明氮素负荷以 NN 为主。而 AN 负荷与 TN 负荷的显著相关性($r=0.740, P<0.01$)表明肥料未完全转化就随降雨流失。7月16日降雨中 NN 和 PN 负荷分别为69.6、56.47 kg,占 TN 的42%和34%,NN、PN 负荷均与 TN 负荷呈显著性

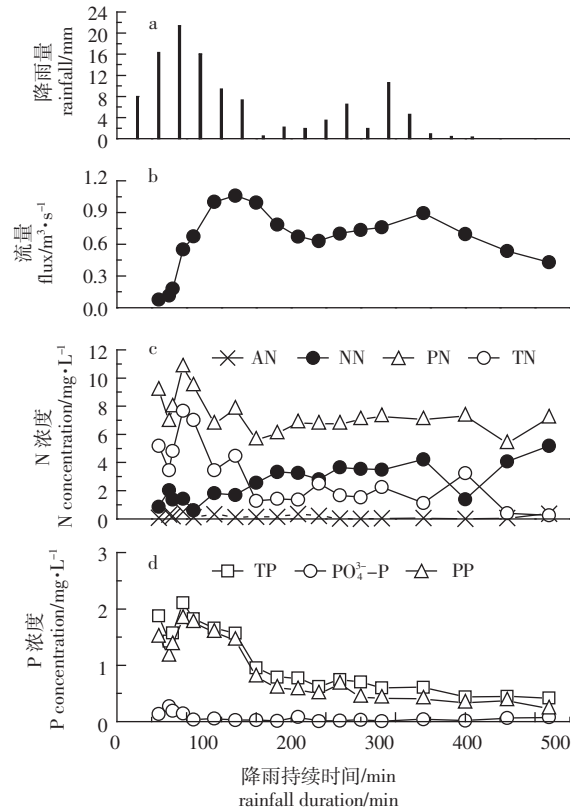


图4 7月16日次降雨径流过程及污染物浓度变化

Figure 4 Changes of rainfall-runoff and pollutants concentration in 16 Jul, 2007

关系($r=0.849, P<0.01; r=0.691, P<0.01$),氮素流失负荷以 NN 和 PN 为主。可见施肥后首场大雨径流氮素流失机制主要是 NN 的淋失,而暴雨径流氮素流失关系到地表径流 PN 流失机制与壤中流 NN 淋失机制。两次降雨 PP 负荷分别占 TP 的80%和83%,降雨条件对磷排放负荷影响不大,降雨径流中均以 PP 为主,结果与前人研究相似^[12,13]。而两次降雨中 PN、PP 负荷均与泥沙(SS)负荷呈显著相关($r_{PN}=0.988, r_{PP}=0.992, P<0.01; r_{PN}=0.830, r_{PP}=0.960, P<0.01$),表明 PN、PP 流失与泥沙流失关系密切。李庆召^[13]认为,径流中的泥沙对磷有吸附富集作用,PP 随地表径流搬运迁移是磷的主要流失形式。

表2 次降雨径流量与氮磷负荷

Table 2 Flux and loads of N and P in rainfall-runoff events

降雨事件	累积 流量/m³	负荷/kg							
		AN	NN	PN	TN	PO ₄ ³⁻ -P	TP	PP	SS
2007-05-30	1 510.91	0.35	7.41	2.73	12.27	0.06	1.04	0.83	930.6
2007-07-16	23 929.37	3.01	69.6	56.47	167.04	0.94	20.75	17.15	23 444.23

本文选取一定比例的径流量,计算各污染物负荷占其总负荷的比例,表征各污染物负荷在径流量中的分布特征(表3)。AN、PN、TP、PP 及 SS 的负荷分布比

表 3 占总径流量不同比例的径流所运移的污染负荷(%)

Table 3 The percentage of pollutant loads transported by the portion with different percentages of total flow volume

指标	降雨日期	不同比例的径流量		
		33%	53%	83%
AN	5 月 30 日	47%	73%	93%
	7 月 16 日	51%	78%	85%
NN	5 月 30 日	13%	36%	71%
	7 月 16 日	21%	45%	80%
PN	5 月 30 日	69%	83%	95%
	7 月 16 日	52%	67%	92%
TN	5 月 30 日	29%	49%	79%
	7 月 16 日	34%	54%	85%
PO ₄ ³⁻ -P	5 月 30 日	23%	47%	84%
	7 月 16 日	39%	56%	77%
TP	5 月 30 日	59%	81%	96%
	7 月 16 日	54%	71%	92%
PP	5 月 30 日	64%	86%	97%
	7 月 16 日	59%	76%	92%
SS	5 月 30 日	75%	92%	99%
	7 月 16 日	71%	83%	96%

例均大于其对应的径流量比例,说明这些指标负荷主要分布在初期径流中。而 NN、TN 和 PO₄³⁻-P 的负荷分布比例均小于其对应的流量比例,表明其负荷主要分布在径流后期。

3 讨论

3.1 降雨条件对氮磷流失的影响

降雨径流中污染物浓度的变化不仅与径流量有关,同时还取决于降雨量、降雨强度和降雨前施肥等多种因素,因此降雨条件对氮磷流失影响显著。暴雨径流中氮磷浓度整体表现为初期径流中污染浓度高于后期径流中污染浓度,初期径流污染负荷高,具有明显的冲刷效应,是暴雨径流污染排放过程的基本特征。降雨初期虽然流量不大,但由于暴雨具有较大的强度和冲击负荷,其冲刷的污染物可能会达到整个暴雨冲刷量的 90%^[10]。施肥后首场大雨径流中氮素浓度呈上升趋势,TN 浓度线与 NN 浓度线十分吻合,NN 负荷集中在径流后期分布,氮素流失主要表现为 NN 的淋溶。

两次降雨径流中氮素形态均发生了明显的变化:初期径流以 PN 为主,随降雨持续,PN 被 NN 所取代。但在暴雨径流中 PN 主导时间更长,主要与降雨强度与冲击负荷有关;在施肥后首场大雨径流中 NN 主导地位更明显。降雨初期地表大量的颗粒态物质被冲刷

下来正是径流中 PN 浓度很高的原因所在。降雨后期,地表冲刷的污染物含量下降,土壤中的水开始下渗,淋溶起主导作用,氮素以 NN 形式淋失。而紫色土旱坡地土层浅薄,下伏透水性极弱的紫色砂泥岩,降雨渗入土壤后很快到达母岩,难以继续下渗,坡向势能使大部分土壤水以壤中流的形式顺坡向下迁移,带出大量 NN。壤中流汇入地表径流,从而控制了地表径流的退水过程,NN 浓度在径流后期占主导也说明径流后期氮素流失与壤中流有关。而施肥后土壤表层氮含量很高,增大了壤中流中 NN 的淋失浓度。贾海燕^[14]研究认为 NN 淋失受施肥影响,壤中流中 NN 是地表径流中的 20 倍,远远高于未施肥土壤。而该小流域坡耕地面积大,玉米种植的一次性大量施肥与当地壤中流产流模式的耦合,造成大量氮素来不及与土壤发生交换作用,而随水不断向下运移,最终以 NN 形式流出根层,故施肥后首场降雨中坡地硝酸盐淋失控制着氮素的流失。

3.2 典型降雨径流中氮磷流失的风险

紫色丘陵区降雨极度不均,集中在 6 月—8 月,雨季多暴雨。且紫色土土层浅薄,耕作频繁,水土流失严重。暴雨的强冲击负荷和冲刷效应将带走大量泥沙。近年来,国内外学者研究认为,98% 的养分由泥沙流失引起^[15],所以泥沙的流失势必携带大量氮磷物质随暴雨径流进入水体,增加地表水发生富营养化的风险。而该区地表径流氮素平均浓度达 2.58 mg·L⁻¹^[16],已经远远超过了富营养化发生标准。由暴雨径流所致的氮磷排放负荷(本研究暴雨中 TN 排放负荷占年平均负荷 287 kg^[16]的 58%)可知,暴雨对该区地表水体质量恶化贡献十分巨大。

施肥后降雨虽然能增加氮肥的肥效,但由于土壤表层氮含量很高,大雨条件与紫色土区壤中流及其发育的产流特征耦合^[14,17],增大了该区 NN 流失风险。该区农民习惯在降雨前施肥,施肥管理使得紫色土区坡耕地壤中流中 NN 浓度远远高于地下水 NN 浓度的标准(10 mg·L⁻¹),3 a 年平均含量高达 14.92 mg·L⁻¹^[17],从而造成该区浅层地下水 NN 含量偏高。汪涛、陈克亮等^[18,8]的研究都表明,该区半数饮用水中 NN 含量超标,严重威胁人体健康。

4 结论

(1)流量曲线与浓度曲线趋势相似。径流初期 PN、TP、PP 浓度高于径流后期,初期冲刷效应明显。径流中氮素初期以 PN 为主,后期以 NN 为主。径流中

磷素以 PP 为主。

(2) 初期径流中 AN、PN、TP、PP 及 SS 负荷分布较大。NN、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 负荷主要在径流后期分布。

(3) 降雨条件对氮磷流失影响显著,暴雨径流氮素流失体现初期地表冲刷和后期 NN 淋溶两个过程。施肥后首场降雨径流过程氮素流失主要表现为 NN 的淋失。暴雨径流产生的氮磷负荷巨大,TN 与 TP 分别为 167.04 kg 和 20.75 kg,对地表水构成威胁。施肥后首场降雨径流中 NN 负荷占 TN 负荷的 60%,施肥与当地水文特征的耦合将增大 NN 淋失风险。

参考文献:

- [1] Ranjith P Udawatta, Peter P Motavalli. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with claypan soils[J]. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 2006(117):39-48.
- [2] R richard Lowerance, Robert L Todd. Nutrient cycling in an agricultural watershed: II. Streamflow and artificial drainage[J]. *J Environ Qual*, 1984, 13(1):27-32.
- [3] 魏林宏, 张 斌, 程训强. 水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(9):1145-1150.
WEI Lin-hong, ZHANG Bin, CHENG Xun-qiang. Effects of hydrological factors on nitrogen loss in small agricultural catchments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(9):1145-1150.
- [4] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. *环境科学*, 2004, 25(6):108-112.
HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi watershed[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6):108-112.
- [5] 张荣保, 姚 琪, 计 勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1):94-98.
ZHANG Rong-bao, YAO Qi, JI Yong, et al. A study on law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of tihu basin—a case study at Meilin watershed in Yising City of Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1):94-98.
- [6] 张荣社, 周 琪, 史云鹏, 等. 滇池流域农业区的暴雨径流特征研究[J]. *中国给排水*, 2003, 19(2):13-16.
ZHANG Rong-she, ZHOU Qi, SHI Yun-peng, et al. Study on storm runoff characteristics in agricultural area in the Dianchi Valleys[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(2):13-16.
- [7] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2):326-331.
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):326-331.
- [8] 陈克亮, 朱晓东, 朱 波, 等. 川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4):1060-1064.
CHEN Ke-liang, ZHU Xiao-dong, ZHU Bo, et al. Temporal and spatial variation of NO_3^- -N pollution in groundwater in small watershed of central sichuan basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):1060-1064.
- [9] 谢贤群, 王立军. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998. 104-279.
XIE Xian-Qun, WANG Li-Jun. Network observation and analysis standard methods for Chinese ecosystem study—observation and analysis of elements of water environment[M]. Beijing: China Standard Press, 1998. 104-279.
- [10] IWA specialist group on use of microphysics in water pollution control[C]. Constructed wetland for pollution control. WA publishing, 2000.
- [11] Van Herpe Y, Troch P A. Spatial and temporal variations in surface water nitrate concentrations in a mixed land use catchment under humid temperate climatic conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14:2439-2455.
- [12] 徐泰平, 朱 波, 汪 涛, 等. 不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(6):139-144.
XU Tai-ping, ZHU Bo, WANG Tao, et al. Nutrient loss from slope cropland of purple soil under different rainfall erosivities[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6):139-144.
- [13] 李庆召, 王定勇, 朱 波. 自然降雨条件下紫色土区磷素的非点源输出规律[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6):1050-1052.
LI Qing-zhao, WANG Ding-yong, ZHU Bo. The rule of phosphorus load with runoff in purple soil by non-point source way[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1050-1052.
- [14] 贾海燕, 雷阿林, 雷俊山, 等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10):1658-1664.
JIA Hai-yan, LEI A-lin, LEI Jun-shan, et al. Nitrate-N loss affected by the runoff process in purple soil simulation study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10):1658-1664.
- [15] 白红英, 唐克丽, 陈文亮, 等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(3):14-19.
BAI Hong-ying, TANG Ke-li, CHEN Wen-liang, et al. Studies on the process of soil erosion and nutrient loss in the sloping lands[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(3):14-19.
- [16] 朱 波, 汪 涛, 徐泰平, 等. 紫色土丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. *山地学报*, 2006, 24(5):601-606.
ZHU Bo, WANG Tao, XU Tai-ping, et al. Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(5):601-606.
- [17] 朱 波, 汪 涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3):525-533.
ZHU Bo, WANG Tao, KUANG FU-hong, et al. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):525-533.
- [18] 汪 涛, 朱 波, 高美荣, 等. 川中丘陵区典型小流域地下水硝酸盐污染分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3):84-87.
WANG Tao, ZHU Bo, GAO Mei-rong, et al. Nitrate pollution of groundwater in a typical small watershed in the central sichuan hilly region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3):84-87.