

紫色土农业小流域径流过程与氮流失尺度效应

章熙锋¹, 申东², 唐家良¹, 王芮¹, 薛菲¹

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000)

摘要:为揭示紫色土丘陵区小流域径流过程和氮素流失过程中迁移转化机制,同步监测了该区域内苏蓉(3.01 hm²)、截流(35 hm²)、大兴(480 hm²)、万安(1 236 hm²)4个梯级小流域径流过程与氮素迁移特征,分析了不同雨型条件下典型农业小流域中氮素迁移转化规律与尺度效应。结果表明:流域面积越小洪峰对降雨响应越快,随着面积增大,洪峰在流域中有明显的滞后和坦化现象;全氮(TN)、硝态氮(NO₃-N)浓度在降雨过程中呈现出较为明显的两段式特征,降雨产流初期及径流峰前期波动较大,退水期浓度缓慢上升。相较于人为影响较强的源头小流域(苏蓉)而言,尺度较大小流域的 TN 浓度有较为明显的削减,但 NO₃-N 仍是氮素流失的主要形式。根据 NCL-NCF 曲线可知,历时短、强度大的暴雨更容易产生“初始冲刷效应”,梯级流域对 AN 负荷有明显消减作用。携带大量 NO₃-N 的壤中流和地下水控制退水过程线,并不断补充水体中氮素负荷,表现出一定的“末期冲刷效应”。运用数理统计方法得出 TN 流失总量与流域面积之间的经验公式,可为区域内小流域氮流失通量估算提供依据。

关键词:水文学;尺度效应;径流过程;紫色土;氮流失

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0072-09

Scale Effects on Characteristics of Runoff Processes and Nitrogen Losses in a Small Agricultural Catchment in Purple Soil Region

ZHANG Xifeng¹, SHEN Dong², TANG Jialiang¹, WANG Rui¹, XUE Fei¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of

Water Resources, Chengdu 610041, China; 2. Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to elucidate the nitrogen loss mechanisms and runoff process in agricultural catchments in hilly purple soil region. Synchronized monitoring on runoff process and nitrogen transport was carried out during three storm events at four cascading small watershed, which are Surong, Jieliu, Daxing and Wan'an catchments. In addition, we analyzed the regulation of nitrogen transportation and scales effects of runoff process. The results showed that the peak discharge had the quick response to rainfall in smaller catchments while delayed and smoothed peak discharge appeared in lower reaches at Daxing and Wan'an stations; total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃-N) concentration in the process of rainfall showed the obvious characteristics in the two stage, the drastic fluctuations in the runoff production, and concentration rise in flow withdraw. Compared with Surong station, TN concentrations in larger catchments decreased obviously, NO₃-N was the main form of nitrogen loss. According to NCF-NCL curve, short and heavy rain is more likely to produce the 'first flush' effect, however, cascading small watershed showed the significant reduction in storm. The subsurface flow and groundwater flow which carries a large number of NO₃-N controlled receding process line, and continuously added nitrogen load in the water, showing the 'end flush' effect. Regressed empirical equations between cumulated TN load and watershed area were obtained, which could be used to provide reference for estimating nitrogen losses in the similar watersheds.

Keywords: hydrology; scale effects; runoff process; purple soil; nitrate nitrogen

收稿日期: 2017-03-06

修回日期: 2017-04-27

资助项目: 中国科学院西部青年学者 A 类项目“紫色土丘陵区农业小流域水体病原菌污染特征及其去除技术”; 中国科学院 STS 项目(KFJ-SW-STS-142)

第一作者: 章熙锋(1990—), 男, 安徽太湖人, 助理工程师, 硕士, 研究方向为流域水文学及环境污染。E-mail: zxfkjc@imde.ac.cn

通信作者: 唐家良(1975—), 男, 四川隆昌人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事水文与土壤地理研究。E-mail: jltang@imde.ac.cn

农业营养盐类形成的非点源污染是水体污染控制与流域治理的重要方面,其中氮排放规律与负荷是国内外研究的热点^[1-2]。研究者在淮河流域^[3]、海河流域^[4]、太湖流域^[5]、九龙江流域^[6]、长江流域^[7]等地区开展了非点源氮在大流域尺度上的迁移研究及通量估算工作。而在小流域尺度(0.5~100 km²)的监测研究工作近年也逐渐增多^[8-9],不同监测尺度估算的面源污染输出有较大差异,大者可达一个数量级^[10]。在小流域面源污染负荷研究中,由于流域地形产生汇流机制差异和采用不同插值方法运算累积流量导致的误差是计算结果差异较大的原因。由于影响氮素污染负荷的影响因子较多,因此,在同一区域开展不同尺度梯级小流域地表产流过程(包括洪峰流量对降雨响应)与氮素流失的协同监测与研究,对揭示氮在小流域尺度的输移过程规律和进行氮素输移通量估算具有重要意义。

紫色土区在在四川省紫色土面积约 16 万 km², 占全省总土地面积的 28%,耕地约 466 万 hm², 占全省耕地面积的 68%,是四川乃至全国重要的粮食基地之一^[11]。紫色土地基岩埋深较浅,土层浅薄,侵蚀作用强烈^[12]。近年来,由于频繁耕作以及不合理的施肥管理措施使得区域内农业面源问题日益突出,但前期研究集中在坡地尺度流失导致的营养盐流失^[13-14];在小流域尺度的研究则集中在不同土地利用源汇流后的营养盐流失特征和通量^[15-16]。由于小流域不同尺度径流过程存在差异,因此针对不同雨型下不同尺度梯级小流域氮素迁移特征研究将有助于揭示紫色土丘陵区农业小流域氮流失过程中的迁移转化机制,从而为紫色土区非点源氮污染总量估算与防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取盐亭弥江万安梯级小流域,该小流域位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡、大兴乡和云溪镇(105°27'E,31°16'N),为典型亚热带季风气候,年均气温 17.3℃,多年平均降水量为 826 mm,区内降雨分布极不均匀,超过 80%的降雨集中在雨季(5—9 月)^[17]。

表 1 小流域基本概况

小流域 基本情况 点位代号	流域 面积/ hm ²	土地利用方式			流域坡度河道坡降	
		林地	耕地	居民	平均	河道
		比例/%	比例/%	用地/%	坡度/%	坡降/‰
1	3.01	35.90	10.60	53.50	13.9	—
2	35	31.30	55	10.50	14.09	0.05
3	480	42.01	40.70	3.23	15	0.02
4	1236	56.30	37.10	5.40	16.29	0.02

万安梯级小流域监测系统(图 1)包括:苏蓉小流域(3.01 hm²)、截流小流域(35 hm²)、大兴小流域(480 hm²)、万安小流域(1 236 hm²),各小流域出口为各级支沟汇流处,各出口均建有标准水文观测堰和观测房,通过静水井与沟道水连通测定水位,分别安装水位计和自动水沙取样器,4 个小流域的土地利用方式,平均坡度,河道坡降等情况见表 1。

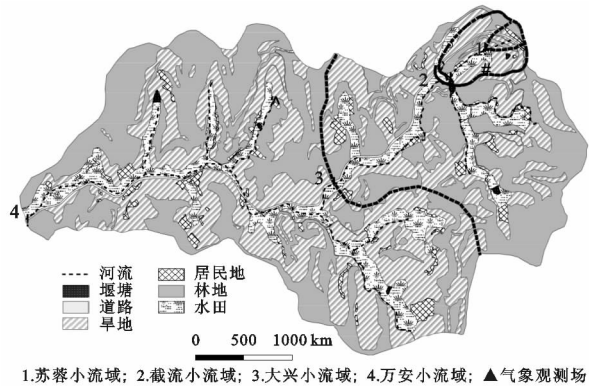


图 1 小流域土地利用及点位

1.2 样品采集与分析

小流域内安装的自动气象观测站(MAWA301, Vasaila 公司,芬兰)自动获取降雨过程数据。各水文站水位数据分别由一台浮子式水位计(重庆华正水文仪器有限公司,中国)和一台 Odyssey 水位计(Data-flow Systems Pty LTD,新西兰)采集,并根据率定公式计算流量数据。当降雨强度超过 6 mm/h 时,由 ISCO 自动采样仪(ISCO,美国)自动采集过程样,前期 12 个样品每 10~20 min 采集 1 个,后期 12 个样品每 1 h 或 2 h 采集 1 个样品。

样品采集结束后及时保存于 4℃ 冰箱内,并于 48 h 内分析完毕。部分水样通过 0.45 μm 滤膜(Whatman,英国)过滤,过滤液的铵态氮(NH₄-N)、硝态氮(NO₃-N)和亚硝态氮(NO₂-N)由 AA3 连续流动分析仪(Seal 公司,德国)测试分析;原液和过滤液的总氮(TN)、可溶性总氮(DN)加入过硫酸钾消煮后利用紫外分光光度法测定。颗粒态氮(PN)由 TN-DN 计算得出。

1.3 数据分析

数据预处理和统计分析由 Excel 2007(Microsoft Corporation,美国)和 SPSS 17.0(SPSS Inc.,美国)完成;制图由 Origin 8.5(Origin Lab Corporation,美国)和 ArcGIS 9.3(ESRI,美国)软件完成。

2 结果与分析

2.1 径流量对降雨的响应

2014 年 8 月 9 日降雨该年第一场产流的暴雨,历时较长,达 7.5 h,且有多峰;9 月 9 日降雨为

2014 年份一场典型的暴雨,具有历时仅 2.3 h、双峰值、降雨强度大的特点,最大雨强达 14.4 mm/h;6 月 23 日降雨为 2015 年第一场产流大暴雨(降雨量超过 100 mm),具有历时长(超过 24 h)、多峰值特点。3 场降雨 10,30,60 min 最大降雨量等见表 2。降雨过程中产生前半降雨量用时与总降雨历时的比值称为降雨时间偏度系数^[18],两场降雨的偏度系数分别为 0.29,0.6,0.27。3 场降雨前 7 天降雨量为 2.2,6.1,9.6 mm(表 2)。

表 2 2014 年 8 月 9 日、2014 年 9 月 9 日和
2015 年 6 月 23 日降雨特征

统计值	日期(年-月-日)		
	2014-08-09	2014-09-09	2015-06-23
前 7 d 降雨量/mm	2.2	6.1	9.6
10 min 最大降雨量/mm	5.7	5	12.4
30 min 最大降雨量/mm	12.7	13	29.6
60 min 最大降雨量/mm	15.3	14.4	27.2
降雨历时/h	7.5	2.3	29.8
偏度系数	0.29	0.6	0.27
雨强平均值/(mm·h ⁻¹)	6.3	11.6	3.6
降雨总量/mm	47.2	26.6	106.7

小流域不同梯级监测断面流量在降雨后均产生明显的多峰现象,响应趋势大致相同,但对降雨量响应的滞后时间不同。由图 2 可以看出,1 号小流域和 2 号小流域是坡面产流汇流处,降雨开始后,流量过程线几乎与降雨峰同步变化。根据霍顿产流理论,当满足降雨强度 $i >$ 下渗容量 f_p ,包气带土壤含水量 I —田间持水量 $E <$ 包气带缺水量 D 时,就会出现尖瘦、涨落迅速的洪水过程线^[19],产生单一的地面径流,均表现为超渗产流的特征。同时,由于 1 号小流域面积最小且硬化地表面积相对较大,使其径流响应速度更快。随着流域尺度的增大,洪水波的滞后和坦化作用越明显,洪峰到达 3 号小流域出口呈现一个较胖的峰形。但径流峰值对降雨量峰值的响应有一定差异,6 月 23 日第一个降雨量峰值前降雨量仅为 1.4 mm,而 8 月 9 日和 9 月 9 日第一个降雨量峰值前降雨量为 2.2,2.6 mm,土壤含水量相对饱和,径流峰值对降雨峰值响应更为迅速。但 3 号与 1 号、2 号小流域相比径流总量有幂次级增长,3 场降雨流量峰值分别为 0.93,0.52,5.13 m³/s。且径流峰值过后,经历退水历时和降雨总量具有明显相关性,3 场降雨量分别为 47.2,26.6,106.7 mm,且退水历时约为 9,6,20 h。

4 号小流域出口表现为突出的“滞后效应”和“坦化现象”。8 月 9 日和 9 月 9 日两场降雨瞬时雨强较小,流量呈现缓慢上涨趋势,且几乎对降雨峰值无明显响应。6 月 23 日降雨瞬时最大雨强 27.2 mm/h,3

个降雨峰值间隔 2,13 h,导致流量出现多峰现象。3 场降雨几乎结束 4,7,3 h 后流量才达到峰值,流量峰值为 1.58,0.87,8.01 m³/s。3 场降雨退水历时分别为 24,14,72 h。据辛伟等^[20]的人工模拟降雨试验表明紫色土坡地地表径流退水常数值为 0.41~0.66,降雨结束 5 min 内迅速衰退,壤中流退水常数为 0.91~0.99,消退过程漫长(16~24 h)。本研究中三场降雨结束后地表径流迅速消退,此后是由壤中流和地下径流补充流量,也证明地下流水消退是一个十分缓慢的过程,洪水波的移行和坦化必然导致洪峰出现时间的推迟和流量的衰减,因此二者叠加使得万安小流域径流出现明显的滞后。

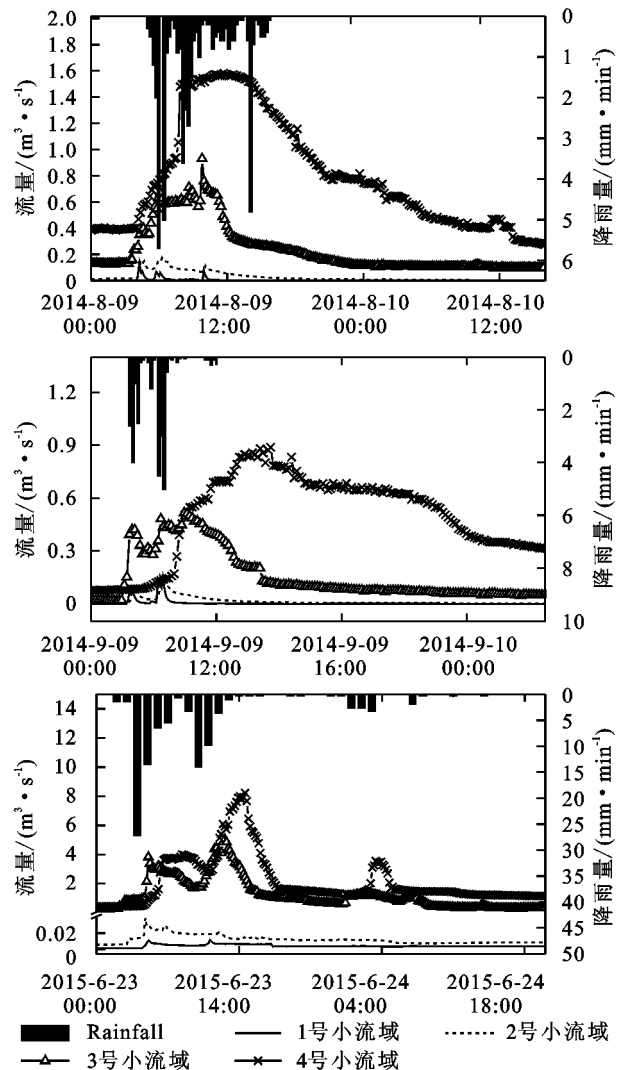


图 2 2014 年 8 月 9 日(上),2014 年 9 月 9 日(中),

2015 年 6 月 23 日(下)径流对降雨过程的响应

2.2 暴雨径流量与氮浓度变化特征

各监测断面 TN, DN, AN, NO_x-N 浓度和径流量变化见图 3(8 月 9 日苏蓉小流域由于采样仪器出现故障,只采集了 7 个样品)。与径流量对降雨的响应不同,各堰口 TN, DN, AN, NO_x-N 浓度并未表现出

与径流量相同的变化趋势,而是具有明显的阶段动态特征。降雨初期,8月9日降雨偏度系数较小,受霍顿坡面流影响较大的1号、2号小流域径流量随降雨同步变化,各形态氮素浓度随径流量波动式上升,但随着流域面积的增大、不同坡面汇流增多,3、4号小流域径流量却呈现缓慢上升趋势,此阶段各形态氮浓度与径流量变化保持一致,即氮素浓度随径流量的增大而升高;9月9日急暴雨呈现明显的双峰值特征,1号、2号、3号小流域均表现出超渗产流的特征:流量随着降雨量而“暴涨暴跌”,氮浓度随径流量涨落而升降,4号小流域几乎对降雨峰值无明显响应,呈缓慢上升趋势。但氮素浓度峰值的出现时间相对于径流量峰值有一定的滞后,并且流域面积越大这种“滞后效应”越明显。6月23日降雨历时较长,强降雨主要集中在3个时段,在第一个降雨峰前1号、2号、3号、4号小流域均表现为氮素浓度随径流量缓慢增加。径流峰值过后,径流量对氮素浓度调节作用发生变化,与降雨初期氮浓度随流量同步变化不同:三场次降雨后期地表径流逐渐减少,地表冲刷泥沙携带的AN逐渐减少,并由携带大量NO_x-N壤中流补充,经历漫长退水过程,其他形态氮素TN, DN, NO_x-N浓度均逐渐升高并达到峰值。随流域面积的增大,与径流峰值的移行和坦化作用相似,污染物浓度的峰值强度和出峰时间也随着流域面积的增大而减弱和延滞(图3中椭圆标记处)。8月9日次降雨事件中2号、3号、4号小流域TN浓度峰值滞后径流峰值约3, 3.5, 10 h; 9月9日次降雨事件中1号、2号、3号、4号TN浓度峰值滞后径流峰值约1.4, 4.7, 6, 10 h; 6月23日次降雨事件中1号、2号、3号、4号TN浓度峰值滞后径流峰值约1.2, 3.5, 6.6, 11 h。

总体来说,3场次降雨中AN浓度变化较稳定且维持在较低水平。但TN变化较剧烈,与1号小流域出口相比较,2,3,4号小流域出口在8月9日次降雨事件中TN平均浓度分别削减60%,57%,65%,在9月9日次降雨事件中TN平均浓度分别削减59%,61%,79%,在6月23日次降雨事件中TN平均浓度分别削减43.2%,41.2%,43.3%。可见由居民点产生的氮素高负荷在流域迁移过程中由于水体稀释和净化作用而大大减少。如表3所示,8月9日降雨是玉米季施肥后第一场暴雨,全流域TN, DN, AN, NO_x-N平均浓度为6.95, 6.88, 0.33, 5.29 mg/L, 6月23日降雨为2015年一场产流的强降雨全流域TN, DN, AN, NO_x-N平均浓度为6.57, 5.63, 0.59, 4.9 mg/L, 而9月9日降雨全流域TN, DN, AN, NO_x-N平均浓度为4.84, 3.15, 0.56, 2.63 mg/L。除8月9日降雨AN平均浓度小于9月9日外, TN, DN, NO_x-N均出现了明显的第一次暴雨冲刷(first flush)。此外,9月9日降雨前7天降雨量约为8月9日3倍,印证了前期降雨量可能是决定污染物初始累积的一个重要影响因素^[21]。徐泰平等^[22]在坡耕地的研究表明,径流中PN主要通过地表径流携带而流失,而NO_x-N主要通过壤中流携带而流失。本研究中3场降雨PN/TN变化范围为0.004~0.07, 0.16~0.36, 0.058~0.42,表明泥沙冲刷作用不明显,氮素来源主要为表层土壤水浸润洗提过程造成的随壤中流中NO_x-N流失。由图3可以看出,暴雨径流中NO_x-N与TN过程线变化一致,且NO_x-N/TN的变化范围为0.49~0.89, 0.46~0.59, 0.23~0.72,表明硝酸盐淋溶损失是小流域氮素流失的最主要方式。

表 3 3场暴雨事件中小流域径流氮素浓度平均值

地点	日期 (月-日)	TN/ (mg · L ⁻¹)	DN/ (mg · L ⁻¹)	NH ₄ -N/ mg	NO _x -N/ (mg · L ⁻¹)	NO _x -N/ TN
1号小流域	08-09	12.74±0.21	12.77±0.16	0.80±0.05	12.47±0.94	0.98
	09-09	9.66±2.43	6.47±1.96	1.41±1.31	5.53±3.54	0.57
	06-23	9.55±3.15	8.43±3.11	0.83±1.035	7.63±3.31	0.80
2号小流域	08-09	5.13±0.58	5.012±0.56	0.12±0.050	2.65±0.45	0.52
	09-09	3.96±1.35	2.38±0.67	0.46±0.56	1.91±0.80	0.48
	06-23	5.42±0.91	4.48±1.25	0.53±0.23	3.89±1.086	0.72
3号小流域	08-09	5.47±1.19	5.20±1.30	0.16±0.08	2.87±1.10	0.52
	09-09	3.72±1.60	2.21±0.50	0.22±0.05	1.75±0.54	0.47
	06-23	5.61±0.95	4.68±1.32	0.48±0.13	3.93±1.16	0.71
4号小流域	08-09	4.45±0.91	4.53±0.87	0.22±0.08	3.14±1.73	0.71
	09-09	1.99±0.46	1.52±0.33	0.15±0.02	1.20±0.28	0.60
	06-23	5.42±1.26	4.64±2.06	0.49±0.13	4.01±1.51	0.74

注:±后为标准偏差。

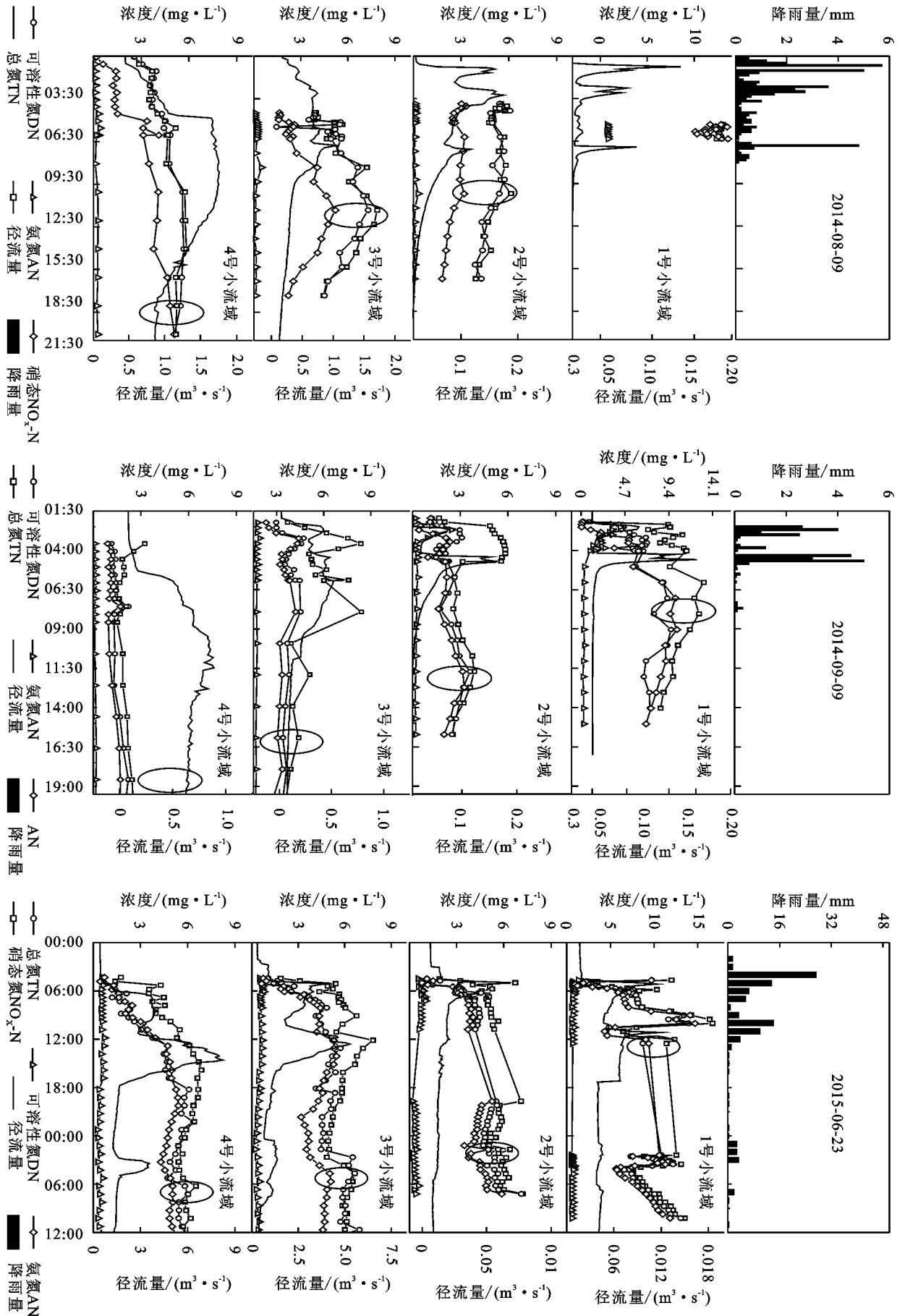


图3 2014年8月9日、9月9日、2015年6月23日流量和氮素浓度变化

图3 2014年8月9日(上)、2014年9月9日(中)、2015年6月23日流量和氮素浓度变化

2.3 氮素累积负荷曲线

本研究采用标准化累积污染物总量(NCL)对标准化累积径流量(NCF)变化曲线对单次降雨事件进行分析,可以明晰径流中污染物总量对降雨响应和随径流量变化的关系^[23]。计算公式如下:

$$NCF = \frac{\int_{t=t_0}^t q(t) dt}{\int_{t=t_0}^{t_e} q(t) dt} \quad (1)$$

$$NCL = \frac{\int_{t=t_0}^t c(t)q(t) dt}{\int_{t=t_0}^{t_e} c(t)q(t) dt} \quad (2)$$

式中: $q(t)$ 为 t 时刻径流速率(m^3/s); $c(t)$ 为 t 时刻氮素浓度(mg/L); t_0 和 t_e 分别表示径流产生和结束时间。 FF_{30} 为描述单次降雨事件中氮迁移负荷分布与径流量的一种定量标准,表示初期30%的径流量所携带的污染负荷的量。

3场次降雨的NCF—NCL曲线(图4—6)显示:径流产生过程与途径对养分迁移过程和途径有着至关重要的作用^[24]。由于基础建设和城镇污水处理设施不足,未经处理的生活污水、屠宰场废水等分散或累积于1号小流域内。

暴雨初期AN位于1:1线的上方且斜率不断加大,但在大约NCF为0.5出现转折,斜率逐渐减小靠近1:1线但一直稳定其上方,9月9日降雨历时短,降雨强度大,对1号小流域“冲刷作用”尤为明显。在2号小流域AN依然位于1:1线上方,但对水体的负荷有较为明显的减轻,直到4号小流域出口AN已经十分接近于1:1线,本次研究中9月9日次降雨事件4个小流域中AN所对应的 FF_{30} 值分别为0.58,0.62,0.35,0.27,这意味着初期30%的径流携带了次降雨中AN58%,62%,35%,27%负荷。说明通过坑塘、过滤带、人工生态湿地等生态工程措施可以很好稀释和硝化水体中的AN浓度,减少AN负荷。

在3场次降雨 NO_x-N 位于1:1线的下方,并且逐渐靠近1:1线,这是由于降雨结束后,壤中流和地下水的补充带来的 NO_x-N 不断加大水体负荷,具有一定的“末期冲刷效应”。8月9日和6月23日次降雨TN, DN, AN, NO_x-N 总体上比9月9日降雨更加接近1:1曲线,说明历时短、降雨强度暴雨对地表扰动程度更大,更容易产生“初始冲刷效应”或“末期冲刷效应”,这与蒋锐^[15]、杨小林^[16]等在截流小流域的研究结果一致。从流域空间尺度来看,随着尺度的增大各形态氮素NCL线更加接近1:1线,据Quinton等^[17]研究表明,随着流域面积的增加,植被覆盖率明显增加,冠层改变降雨动能和强度更加显著,暴雨对氮素负荷的冲刷作用明显减弱。

2.4 氮流失通量与流域面积的关系

由于污染物的输出载体为径流,有研究^[15,25]表明污染物排放和径流量之间呈线性或指数关系,而非点源污染负荷与土地利用类型、土壤理化性质及农业管理方式等也有关系^[24-25],因此从一些复杂的因子中提取关键因素对于估算氮流失通量有重要参考意义。对于某一特定流域面积的区域来讲,由前述结果中降雨—径流曲线、氮浓度变化—流量变化、NCF—NCL曲线分析可知氮素在小流域迁移过程中存在尺度效应,为了明确氮流失与小流域面积的定量关系,将三场降雨中的1号、2号、3号、4号4个小流域TN流失总量变量 y 和流域面积 x 进行拟合,得到较好拟合结果(表4),氮流失通量随流域面积(大于 1.45 hm^2)呈幂函数增长($R^2 \geq 0.92, p < 0.01$)。通过小流域面积与TN流失总量的回归分析,将有助于相似类型小流域的TN流失通量估算和预测。

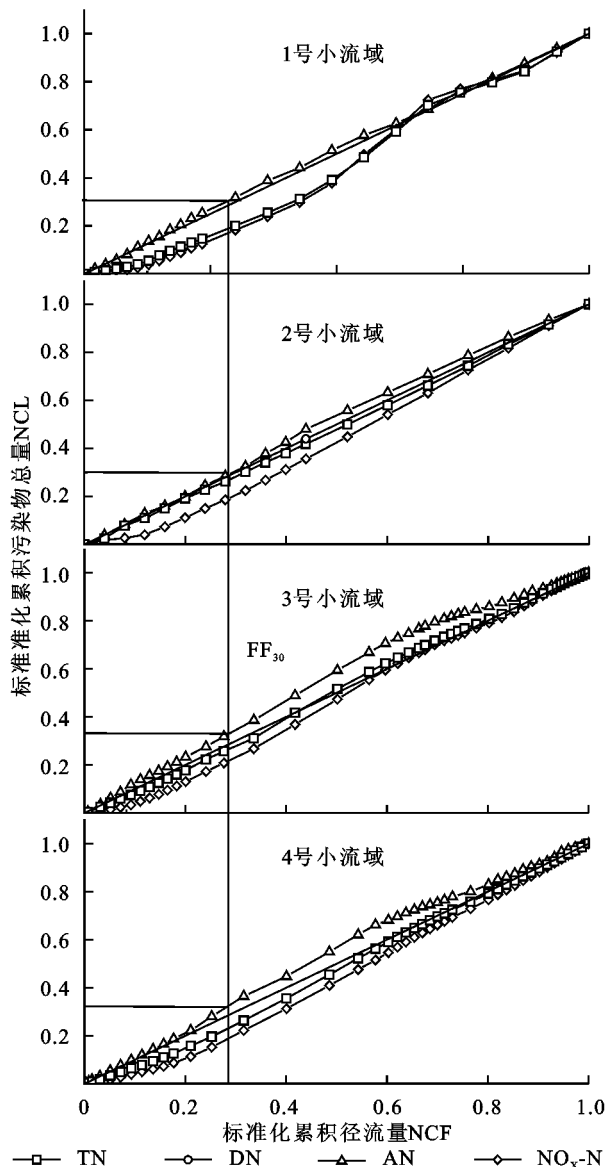


图4 2014年8月9日降雨事件NCF—NCL曲线

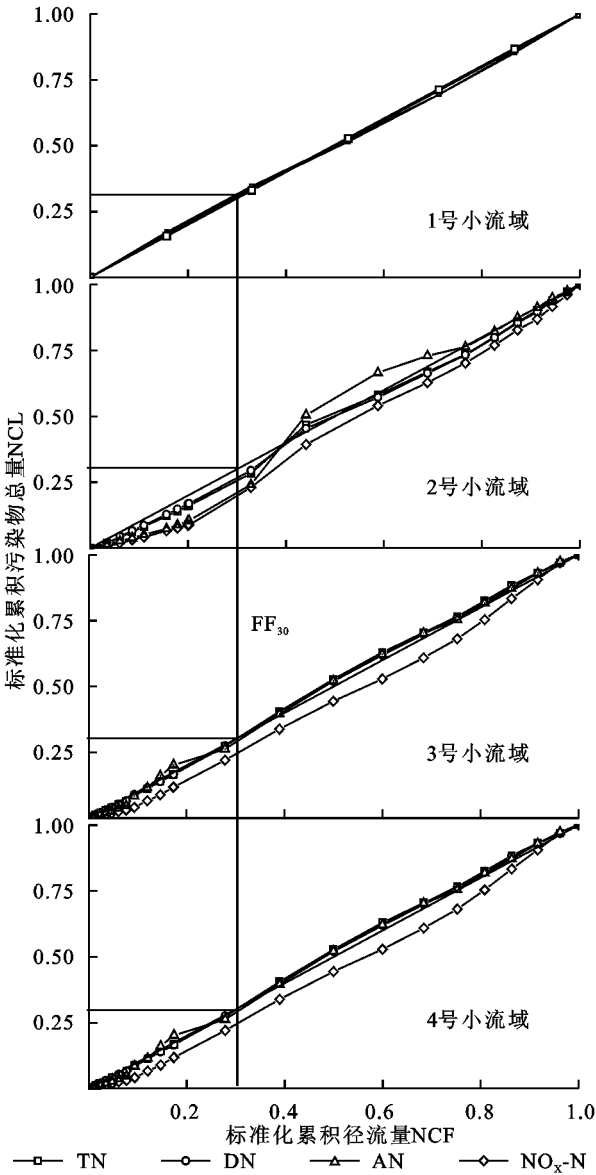


图 5 2014 年 9 月 9 日降雨事件 NCF-NCL 曲线

据学者陈一兵等^[28]双环试验研究表明紫色土稳定入渗率为 101 mm/h,最大入渗率可达 440 mm/h。本研究中最大降雨强度为 27.3 mm/h,尽管地表结皮率可能存在一定差异,会对产流产生一定影响。但据丁文峰等^[29]紫色土坡面小区的野外观测试验在历时 1 个小时 60 mm 雨量的情况下仅观测到壤中流而未观测到地表径流,表明紫色土坡耕地的地表径流产流方式主要为超渗产流,这主要是由于紫色土容重较小,土壤粉粒占比较大,土壤毛管孔隙度较大,导致输水能力较强有关。

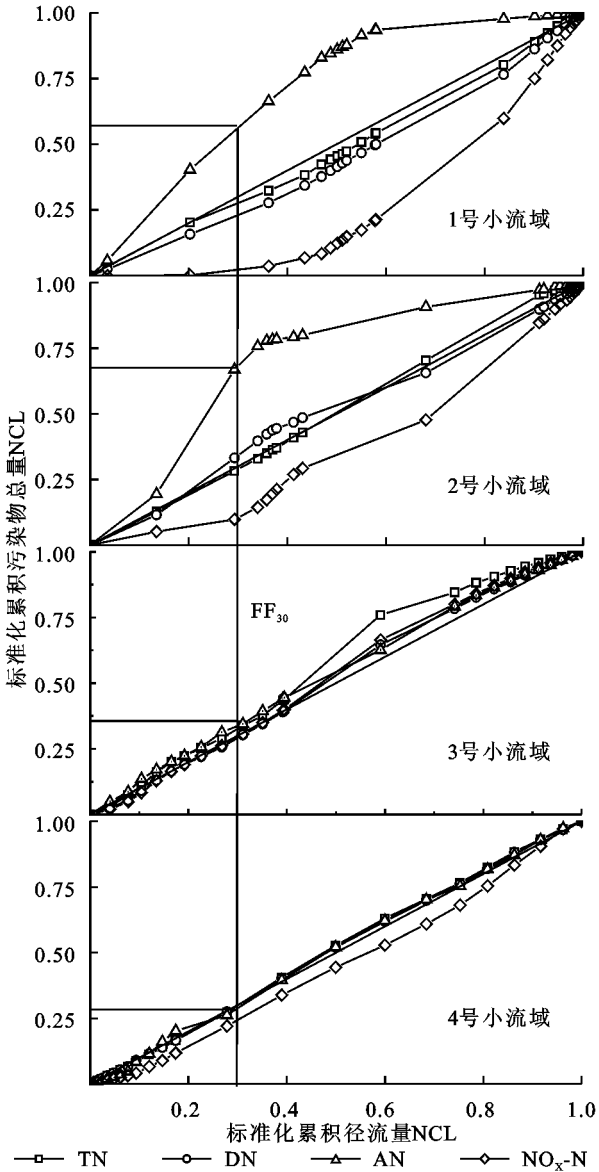


图 6 2015 年 6 月 23 日降雨事件 NCF-NCL 曲线

坡面尺度的产流汇流过程决定小流域洪峰径流响应时间,并且降雨期间的水分储存机制和降雨结束后的释放机制影响着小流域径流的可持续性,从而影响着大尺度的径流形成。1 号和 2 号小流域林地面积分别为 24.2% 和 31.3%,不透水下垫面所占比例较大。因此,降雨期间流量过程几乎与降雨峰同步变

3 讨论

3.1 暴雨径流过程及尺度效应分析

坡面水文过程是小流域水文过程研究的基础,而影响坡面产流的因子十分复杂,其中降雨特性、坡度、土壤理化性质以及土地利用方式等是最主要的因子^[26]。本研究区域紫色土主要由钙质砂页岩风化而成,容重为 1.3~1.5 g/cm³,黏粒<15%,粉粒 32.1%~41.8%,毛管孔隙度为 38.5%~51.7%,田间持水量 28.1%~38.3%^[27]。

表 4 TN 累积流失量 y 与小流域面积 x 的线性回归关系

时间 (年-月-日)	雨型	拟合方程	R ²	p
2014-08-09	暴雨	$y=0.0069(x+32.65)^{0.883}$	0.99	<0.01
2014-09-09	暴雨	$y=0.9923(x-1.45)^{1.3131}$	0.99	<0.01
2015-06-23	大暴雨	$y=125.57(x+0.02)^{0.0034}$	0.92	<0.01

化,降雨结束后流量迅速衰退,呈现“暴涨暴跌”态势。3号、4号小流域林地面积分别为42.01%和56.3%,由于植被冠层有较强的截留和减小降雨势能的作用,导致流量表现出较强的滞后和坦化现象,流量对降雨峰值的已无明显响应,退水历时也相应增加,这也较好地丰富了辛伟等^[20]在坡面尺度降雨退水过程的研究。这与王鸣远等^[30]认为不同空间尺度具有较强的异质性的观点基本一致,再加上不同响应单元与出口距离的差异所带来的非线性,导致大尺度流域的特征并非若干小尺度的简单叠加。本研究中3场降雨结束后地表径流迅速消退,此后是由壤中流和地下径流补充流量,也证明地下水流消退是一个十分缓慢的过程,洪水波的移行和坦化必然导致洪峰出现时间的推迟和流量的衰减,因此二者叠加使得4号小流域径流出现明显的滞后和坦化现象。

3.2 暴雨径流N迁移机制分析

本研究在蒋锐^[15]、杨小林^[16]等的基础上,将研究尺度扩大,进一步揭示了流域尺度对径流和氮素迁移过程的影响。由本研究中3场降雨各形态氮素浓度均表现出较强的削减特征,且1号、2号、3号、4号流域集镇居民点、耕地所占比例依次减少呈一致趋势,印证了朱波等^[31]研究表明单位面积非点源负荷呈现集镇>耕地>林地特点。同时,随着流域面积的增大,流量呈现幂数级增长,各形态氮素在梯级流域迁移过程中不断受到水体的稀释作用。再加上水体本身具有的净化、植物的吸收和微生物的硝化反硝化作用,多种因素耦合导致各形态氮素负荷总体呈现不断减轻趋势。但不同形态氮素表现出的特征并不同,由于城镇生活污水、屠宰场污水、机动车辆维修废水等未经过处理直接排放,造成1号小流域氨氮负荷较高。氨氮与土壤溶液中大量存在的硝氮的流失方式不同,因带负电荷的土壤胶体或泥沙对带正电荷的铵根离子产生吸附,因此氨氮通常不易淋溶,暴雨含沙径流为氨氮迁移的主要载体。在暴雨的冲刷下,苏蓉小流域AN表现出较强的初始冲刷作用,而在下游水体中则经过生态沟渠植物截留,硝化、稀释等作用,浓度明显削减。3场次降雨中,各形态氮素对降雨的响应不同,并未表现出与流量相对应的变化趋势,降雨初期1号、2号小流域各形态氮素随流量波动式上升,但是随着流域面积增大,3号、4号小流域各形态氮素却表现出相对流量滞后的上升,并且流域面积越大这种“滞后效应”越明显。在降雨结束径流量达到洪峰后,经历退水过程的流量逐渐减少,但氮素浓度

均逐渐升高并达到峰值。相对于氨氮易遭受冲刷^[32],硝态氮不易被土壤吸附,是淋溶和地下排水中的主要形态,其淋溶量除受制于降雨特征因素以外,还取决于施肥量、土壤渗透性、作物覆盖等因素。由于紫色土土层浅薄,下层是透水性极弱的紫色砂页岩,降雨进入土壤以后遇到不透水层随即产生壤中流,整个雨季壤中流占流量的50%以上^[33],且壤中流中硝态氮含量高达20 mg/L。暴雨径流过程NO_x-N控制TN变化,壤中流汇流控制着小流域退水过程和硝态氮损失过程。可见,硝酸盐淋溶与流失是紫色土区小流域非点源氮迁移的主要方式。

4 结论

(1) 不同尺度小流域径流过程对暴雨降雨的响应差异较大。坡面汇流形成的洪峰对降雨有较快的响应,但是随着流域面积的增大有较为明显的洪峰滞后和坦化现象;流域面积越大,退水历时越长,4号小流域出口退水历时甚至超过72 h。

(2) 暴雨径流对氮素浓度存在明显的阶段调节作用,径流量峰值之前氮素浓度随流量同步上升,径流量峰值过后,氮素在退水过程中达到峰值。各种形态氮素浓度受前期降雨历时的影响较大,降雨历时越短氮素负荷较高。三场暴雨过程中径流初始冲刷作用不明显,NO_x-N与TN浓度过程线变化趋势一致,径流中TN主要由壤中流和浅层地下水携带的NO_x-N构成。梯级小流域对水体氮素污染有较好的稀释和净化作用,三场次降雨事件中与1号小流域相比较,2号、3号、4号小流域2014年8月9日、2014年9月9日和2015年6月23日降雨TN平均浓度分别削减60%,57%,65%和59%,61%,79%和43.2%,41.2%,43.3%。

(3) 由各场次降雨径流中的氮素累积负荷NCF—NCL曲线可知,历时短,降雨强度大暴雨更容易产生“初始冲刷效应”。而随着流域面积的增大,空间异质性增大,主要表现为“末期冲刷效应”作用,即壤中流和地下水控制着退水过程,携带大量的NO_x-N不断加大水体负荷。

(4) 氮流失通量与降雨量明显相关,单次降雨中TN流失总量与小流域面积之间符合幂函数关系。梯级农业小流域氮素流失研究可为紫色土丘陵区氮素流失通量估算提供重要科学依据。

参考文献:

[1] Stutter M A, Langan S J, Cooper R J. Spatial and tem-

- poral dynamics of stream water particulate and dissolved N, P and C forms along a catchment transect, NE Scotland[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350:187-202.
- [2] Little C, Soto D, Lara A, et al. Nitrogen exports at multiple-scales in a southern Chilean watershed(Patagonian Lakes district)[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 87(3): 297-309.
- [3] 蒋艳,彭期冬,骆辉煌,等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(11):1283-1288.
- [4] 葛怀凤,秦大庸,周祖昊,等. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(1):61-67.
- [5] 白晓华. 太湖山地强降雨事件中不同水体的氮磷负荷分析[J]. *云南环境科学*, 2009, 28(4):71-74.
- [6] 陈能汪,洪华生,张珞平,等. 九龙江流域降雨径流污染特征研究[J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2004, 43(4): 537-541.
- [7] Yan W J, Mayorga E, Li X Y, et al. Increasing anthropogenic nitrogen inputs and riverine DIN exports from the Changjiang River basin under changing human pressures. [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24 (24):1134-1138.
- [8] 刘忠翰,贺彬,王宜明,等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响[J]. *地理研究*, 2004, 23 (5):593-604.
- [9] 梁新强,田光明,李华,等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):59-63.
- [10] 李恒鹏,刘晓政,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地利用类型的面源污染产出[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 401-408.
- [11] Zhu B, Chen S, You X, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5):743-749.
- [12] 张信宝,朱波,张建辉,等. 地下地膜截水墙:一种新的节水农业技术[J]. *山地学报*, 1999, 17(2):115-118.
- [13] 汪涛,朱波,罗专溪,等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5):962-970.
- [14] 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.
- [15] 蒋锐,朱波,唐家良,等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 659-666.
- [16] 杨小林,朱波,董玉龙,等. 紫色土丘陵区小流域非点源迁移研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(3):276-283.
- [17] Quinton J N, Edwards G M, Morgan R P C. The influence of vegetation species and plant properties on runoff and soil erosion: results from a rainfall simulation study in south east Spain[J]. *Soil Use & Management*, 1997, 13(3):143-148.
- [18] Zhu B, Wang T, Kuang F, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1419-1426.
- [19] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.
- [20] 辛伟,朱波,唐家良,等. 紫色土丘陵区典型坡地产流及产沙模拟试验研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(2):31-35.
- [21] 李立青,尹澄清,何庆慈,等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(7):1057-1061.
- [22] 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): 139-141.
- [23] Obermann M, Rosenwinkel K H, Tournoud G M. Investigation of first flushes in a medium-sized Mediterranean watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373:405-415.
- [24] Jencso K G, McGlynn B L, Gooseff M N, et al. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach-and plot-scale understanding to the catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): 262-275.
- [25] 杨金玲,张甘霖. 皖南低山丘陵地区流域氮磷径流输出特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2005, 21(3):34-37.
- [26] 刘贤赵,康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J]. *水土保持通报*, 1999, 19(2):57-62.
- [27] 陈正维,刘兴年,朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土地径流预测[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7):72-81.
- [28] 陈一兵, Kim Troubowst. 紫色土渗透性的对比研究[J]. *水土保持通报*, 1997, 17(2):11-13.
- [29] 丁文峰,张平仓,王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2008, 25(3):14-17.
- [30] 王鸣远,杨素堂. 水文过程及其尺度响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(3):1219-1228.
- [31] 朱波,汪涛,王建超,等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. *中国水土保持*, 2010(10):34-36.
- [32] 孔莉莉,张展羽,朱磊. 水文过程中灌区农田非点源氮的归趋研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6):853-860.
- [33] Zhu B, Wang T, Kuang F, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1419-1426.