

太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响

李瑞玲, 张永春, 刘庄, 曾远, 李维新, 张洪玲

(环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:以流域尺度为研究单元, 流量、水质同步监测分析了雨强对太湖缓坡丘陵地区农田土壤养分随地表径流迁移的影响。10场降雨试验结果显示, 雨强对农田氮、磷径流迁移有巨大影响。总磷、磷酸盐及氨氮 EMC 值随雨强的增强而增大; 小降雨强度条件下, 总氮、硝氮 EMC 值随雨强的增强而增大, 强降雨条件下, 其 EMC 值与雨强呈负相关。小雨、中雨、大雨及暴雨条件下, 总氮及总磷的 SMA 值依次为 1.91、311.83、127.65、731.69 g/hm² 及 0.04、7.77、2.99、32.02 g/hm², 与雨强表现出正相关。硝氮及氨氮是氮素迁移的主要类型, 且主要是溶解态迁移。磷酸盐是磷迁移的主要形态。小降雨强度下, 磷以溶解态迁移为主, 随着雨强的增强, 颗粒态磷迁移量逐渐增加, 当雨强达到暴雨时, 磷主要是颗粒态迁移。次降雨量、小时最大雨强、平均雨强及降雨历时影响因素中, 氮、磷迁移量与小时最大雨强及次降雨量显著相关 ($p < 0.01$), 均表现为正相关。

关键词:农业非点源; 雨强; 迁移; 丘陵地区; 太湖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1220-07

Rainfall Intensity Effects on Nutrients Transport in Surface Runoff from Farmlands in Gentle Slope Hilly Area of Taihu Lake Basin

LI Rui-ling, ZHANG Yong-chun, LIU Zhuang, ZENG Yuan, LI Wei-xin, ZHANG Hong-ling

(Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: To investigate the effect of rainfall on agricultural nonpoint source pollution, watershed scale experiments were conducted to study the characteristics of nutrients in surface runoff under different rainfall intensities from farmlands in gentle slope hilly areas around Taihu Lake. Rainfall intensity significantly affected N and P concentrations in runoff. Rainfall intensity was positively related to TP, PO₄³⁻-P and NH₄⁺-N event mean concentrations (EMC). However, this study have found the EMC of TN and NO₃⁻-N to be positively related to rainfall intensity under light rain and negatively related to rainfall intensity under heavy rain. TN and TP site mean amounts (SMA) in runoff were positively related to rainfall intensity and were 1.91, 311.83, 127.65, 731.69 g/hm² and 0.04, 7.77, 2.99, 32.02 g/hm² with rainfall applied under light rain, moderate rain, heavy rain and rainstorm respectively. N in runoff was mainly NO₃⁻-N and NH₄⁺-N and was primarily in dissolved form from Meilin soils. Dissolved P (DP) was the dominant form of TP under light rain, but particulate P (PP) mass loss increased with the increase of rainfall intensity and to be the dominant form when the rainfall intensity reaches rainstorm. Single relationships were used to describe the dependence of TN and TP mass losses in runoff on rainfall, maximum rainfall intensity, average rainfall intensity and rainfall duration respectively. The results showed a significant positive correlation between TN mass loss and rainfall, maximum rainfall intensity respectively ($p < 0.01$) and also TP mass loss and rainfall, maximum rainfall intensity respectively ($p < 0.01$).

Key words: agricultural nonpoint source; rainfall intensity; transport; hilly area; Taihu Lake

土壤中氮、磷是农作物生长的必需元素, 同时也是导致地表水体富营养化的主要营养盐^[1]。太湖的外源污染可分为点源污染和非点源污染。“十五”期间, 一方面我国城市污水处理率逐渐提高, 达到52%, 另一方面旧污水处理厂通过技术改造提高了脱氮除磷能力, 可以预见, 点源污染负荷将不断降低。目前, 农田土壤氮、磷的流失逐渐成为地表水体富营养化的决定性因素^[2], 其特点为通过不确定的途径在不确定的时间排放不确定的量^[3]。大量研究表明, 降雨强度、降雨施肥间隔及施肥量是影响农业非点源污染的主要因素。一般情况下, 降雨径流中污

染物浓度大大高于降雨前浓度^[4]。暴雨期径流污染物浓度也远远超过非暴雨期^[5,6]。极端降雨条件下, 坡地农田随地表径流流失的养分占全年施肥总量的50%以上, 水稻田的养分流失占全年施肥总量的60%左右^[7]。研究发现同一雨强下, 降雨施肥间隔与污染物输出浓度呈负相关; 同一降雨施肥间隔下, 雨强与径流浓度呈正相关^[8]。此外, 作物覆盖

收稿日期: 2009-06-30; 修订日期: 2009-08-19

基金项目: 江苏省太湖水污染治理科技专项 (BK2007731)

作者简介: 李瑞玲 (1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非点源污染及水环境综合整治, E-mail: lrl19830809@163.com

度^[9,10]、土地利用方式^[11,12]及土壤理化性质^[13,14]也是农业非点源污染发生的主要影响因素。

从流域尺度研究农田土壤养分随径流迁移是目前国内外研究的重点,然而降雨作为农业非点源污染的主要驱动力,在常规施肥条件下雨强对氮、磷等养分径流迁移的影响研究明显存在不足。降雨的随机性决定不同年份不同雨强的降雨场次存在明显差异,在核算农业非点源污染排污系数过程中,如不考虑每年雨强的变化,计算结果必将产生较大的误差。本研究通过在太湖缓坡丘陵地区梅林小流域开展的原位野外试验,揭示了雨强对农田氮、磷随地表径流迁移的影响。

1 研究区域与方法

1.1 流域概况

梅林流域位于宜兴市东南(31°20'N, 119°51'E),面积 122 hm²,距太湖约 9 km,属典型的环太湖缓坡丘陵小流域。流域边界清楚,可分为头坳和二坳,头坳子流域 73.7 hm²,二坳子流域 48.3 hm²,海拔落差超 40 m。该地区全年温暖湿润,年均降雨量 1 150 mm,年平均气温 15.5℃。土地利用类型多样,除了海拔较高的山坡被大片的松林和竹林覆盖外,主要土地类型有水稻田、旱地、菜地、板栗林、茶园和梨园等。土壤为红黄壤和水稻土。本研究全部在头坳子流域进行。梅林流域高程图见图 1。梅林土地利用类型见表 1,施肥状况见表 2,土壤理化性质见表 3。

1.2 样品采集与分析方法

流域总出口断面设置矩形堰和降雨流量自动采样仪。矩形堰宽 2 m,表面平整光滑,以确保水的流态不会发生大的变化。流量自动采样仪记录水位过程和采集水样。水位记录时间间隔为 5 min,水样采集整个径流过程,产流初期采集过程密集,间隔为 5 min,中期为 10 min,后期为 15 min,当降雨时间较

长时对采样间隔做适当调整。根据堰流量公式计算出口断面流量。

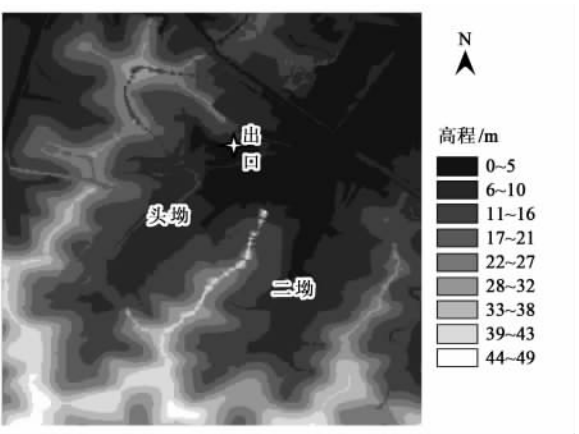


图 1 梅林流域高程图

Fig. 1 Distribution of elevation in Meilin catchment

表 1 梅林头坳小流域土地利用类型百分比/%

Table 1 Percentage of land use types in Meilin catchment/%

土地类型	面积百分比	土地类型	面积百分比
竹林	21.6	果园	7.9
旱地	21.1	草地	6.0
林地	11.7	水塘	2.5
稻田	10.4	菜地	1.7
板栗林	15.6	居民地	1.6

表 2 梅林小流域施肥状况¹⁾

Table 2 Fertilizer applications in Meilin catchment

土地类型	施肥量/kg·hm ⁻²		作物种类
	N	P	
水稻田	792.85	202.35	水稻小麦轮作
菜地	1 140.45	919.95	南瓜、茄子、大蒜等
旱地	125.65	39.4	花生、毛豆、玉米
竹林	206.85	0	毛竹
板栗园	155.33	28.2	板栗

1) 施肥量均以 N、P 计

表 3 梅林小流域土壤理化性质

Table 3 Main properties of soils in Meilin catchment

土地 利用	土壤容重 /g·cm ⁻³	土壤机械分析/%			pH	有机质 /g·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	总磷 /g·kg ⁻¹
		1~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm				
竹林	1.08	17.47	66.89	15.64	4.94	87.9	2.88	0.49
旱地	1.18	8.36	65.33	26.31	4.87	21.4	1.13	0.56
板栗	1.41	22.27	62.49	15.25	6.15	44.9	1.88	0.85
稻田	1.13	2.3	76.2	21.5	6.58	48.6	2.34	0.67
菜地	1.31	14.99	63.76	21.25	5.14	27.5	1.5	1.28

样品测定总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)和正磷酸盐

(PO₄³⁻-P)浓度,溶解态氮、磷含量经 0.45 μm 滤膜过滤后测定,颗粒态氮、磷含量采用差值法计算。水

样测定方法^[15]:氮采用紫外分光光度法测定;TP 采用过硫酸钾氧化,钼锑抗分光光度法, PO_4^{3-} -P 采用钼锑抗分光光度法。

1.3 计算方法

(1) 次降雨径流平均浓度

次降雨径流平均浓度(event mean concentration, EMC)^[16]用来评价降雨径流污染状况,为一场降雨引起的某种营养盐的迁移量除以该场降雨的径流量,公式为:

$$\text{EMC} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i c_i + Q_{i+1} c_{i+1}}{2} \times \Delta t \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times \Delta t \right)} \quad (1)$$

式中,EMC 为次降雨径流平均浓度,mg/L; Q_i 、 Q_{i+1} 为相邻时刻流域径流量, m^3/s ; c_i 、 c_{i+1} 为与 Q_i 、 Q_{i+1} 对应的营养盐浓度,mg/L; Δt 为相邻时间间隔,s; n 为水样数。

(2) 多场降雨径流平均浓度

多场降雨径流平均浓度(site mean concentration, SMC)^[17]是以径流量为权重的多场降雨径流平均浓度,代表某一地点的长期径流平均浓度,公式为:

$$\text{SMC} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times \text{EMC}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

式中,SMC 为多场降雨径流平均浓度,mg/L; W_i 为第 i 场降雨径流量, m^3 ; EMC_i 为第 i 场降雨的次降

雨径流平均浓度,mg/L; n 为降雨场次。

(3) 迁移量指随地表径流迁移的单位面积污染物迁移量。由于径流量是农田污染物迁移的主要载体,提出以径流量为权重的多场降雨径流平均迁移量 SMA,公式为:

$$\text{SMA} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times a_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

式中,SMA 为多场降雨径流平均迁移量, g/hm^2 ; W_i 为第 i 场降雨径流量, m^3 ; a_i 为第 i 场降雨污染物迁移量, g/hm^2 ; n 为降雨场次。

1.4 雨强划分标准

按照气象部门采用的标准将雨强划分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 级,划分标准见表 4。

表 4 雨强划分标准/mm

划分标准	小雨	中雨	大雨	暴雨
12 h 内降雨量	<5	5 ~ 14.9	15 ~ 29.9	≥ 30
24 h 内降雨量	<10	10 ~ 24.9	25 ~ 49.9	≥ 50

2 结果与分析

2.1 降雨径流特征

于 2006 ~ 2008 年初采集了 4 场降雨资料,2003 ~ 2005 年历年观测 6 场降雨(河海大学水文水资源学院崔广柏教授提供),共 10 场降雨,各降雨事件基本特征见表 5。

表 5 降雨基本特征¹⁾

Table 5 Basic characteristics of rainfall

编号	日期	次降雨量/mm	次降雨历时/h	最大雨强/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	径流深/mm	水样数	雨强
070713	2007-07-13	18	3	10.5	1.82	10	大雨
070710	2007-07-10	72.5	7.5	28	24.687	22	暴雨
060721	2006-07-21	5.5	2.25	4	0.824	4	小雨
060705	2006-07-05	110.8	20.42	63.5	28.47	17	暴雨
050514	2005-05-14	37.8	—	—	2.46	24	大雨
050430	2005-04-30	42.3	—	—	3.746	24	大雨
040624	2004-06-24	69.85	16.25	44.7	22.228	29	暴雨
040110	2004-01-10	10.414	13	10.16	11.818	24	中雨
030908	2003-09-08	32.5	10.58	28.2	2.384	24	暴雨
030828	2003-08-28	19.2	5.92	10.5	1.216	24	大雨

1) “—”表示缺失数据

2.2 雨强对氮迁移的影响

2.2.1 不同雨强下氮迁移类型特征

由表 6 可知,不同雨强下氮 SMC 值存在较大差异。小雨、中雨、大雨及暴雨 4 种雨强下,总氮 SMC 值分别为 2.43、5.62、4.36 及 3.95 mg/L,变化为小雨 < 中雨 > 大雨 > 暴雨。硝氮变化与总氮类似。小

雨、中雨、大雨及暴雨条件下氨氮 SMC 值分别为 0.16、0.88、0.58 及 1.44 mg/L。除中雨事件外,氨氮 SMC 值随雨型增强逐渐变大。这是因为强降雨过程含有巨大能量的雨滴,雨滴对富集大量化肥的表土进行反复冲击,使得因土壤侵蚀造成的颗粒态养分大量流失,而氨氮由于更易黏附在土壤颗粒上,雨

强较大时其 EMC 值明显增加. 硝氮与氨氮是氮迁移的主要类型, SMC 分别占总氮的 26.7% ~ 63.8% 与 6.6% ~ 36.5% .

表 6 不同雨强下氮 SMC 值与 SMA 值变化¹⁾

Table 6 Variation in the values of SMC and SMA of nitrogen in runoff under different rainfall intensities

指标	氮	小雨 (n = 1)	中雨 (n = 1)	大雨 (n = 1)	暴雨 (n = 1)
SMC/mg · L ⁻¹	总氮	2.43	5.62	4.36	3.95
	硝氮	0.65	3.53	2.78	1.62
	氨氮	0.16	0.88	0.58	1.44
	亚硝氮	0.02	—	0.06	0.13
SMA/g · hm ⁻²	总氮	1.91	311.83	127.65	731.69
	硝氮	0.51	196.09	85.02	293.02
	氨氮	0.12	48.59	12.88	261.39
	亚硝氮	0.02	—	1.98	24.86

1) n 为降雨事件数

除中雨事件外,各类型氮 SMA 值与雨强均表现为正相关,雨强越强,氮 SMA 值越大. 如暴雨条件下总氮 SMA 值为 731.69 g/hm²,是大雨事件的 5.7 倍,小雨事件的 383 倍. 在梅林流域,中小强度降雨条件下,硝氮更容易成为氮素输出的主要类型;雨强越强,氨氮迁移比重越大.

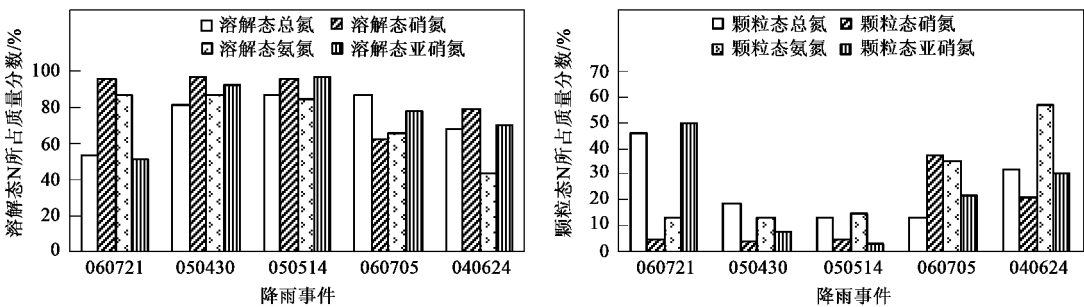


图 2 不同降雨事件中氮迁移形态特征

Fig. 2 Characteristics of transport forms of nitrogen in runoff under different rainfall events

2.3 雨强对磷迁移的影响

2.3.1 不同雨强下磷迁移类型特征

由表 7 可知,小雨、中雨、大雨、暴雨条件下,总磷 SMC 值依次为 0.05、0.14、0.12 与 0.18 mg/L, SMA 值依次为 0.04、7.77、2.99 与 32.02 g/hm². 除中雨事件外,总磷 SMC 值与 SMA 值均呈现出随雨强增强而增大的特征. 磷的这一特点不同于氮,土壤中溶解态磷流失主要为水土界面的扩散作用,而溶解态磷不很活跃,地表径流以溶解态形式带走的土壤表层(10mm)磷较少;有机磷(主要为磷脂与核酸)与矿质磷通常吸附在土壤颗粒上随地表径流迁移,这种形式的磷负荷与土壤迁移量密切相关,而降

中雨事件各类型氮 SMC 值及 SMA 值都较高,甚至大于大雨事件,这是因为中雨事件 040110 发生在冬季,而 9 ~ 10 月菜地施用追肥,11 ~ 12 月小麦施用基肥,由于此阶段降雨明显减少,土壤对氮素的富集作用使得土壤中氮素含量增加,同时冬春两季土地植被覆盖度较低,两者的累加造成该阶段的降雨对土壤侵蚀增强,氮素径流浓度及迁移量增大.

2.2.2 不同雨强下氮迁移形态特征

农田污染物径流迁移主要有 2 种形态:①颗粒态迁移,即污染物黏附在颗粒上,随土壤流失进入水体. ②溶解态迁移,即水溶性较强的污染物被淋洗而进入径流. 不同降雨事件中氮迁移形态质量分数见图 2. 可知 5 场降雨事件中,溶解态总氮迁移质量分数介于 53% ~ 67%,溶解态硝氮介于 62% ~ 96%,溶解态氨氮介于 43% ~ 87%,溶解态亚硝氮介于 51% ~ 97%. 不管是在小降雨强度下,还是在大降雨强度下,氮主要以溶解态迁移,这与梁涛等^[18]、段亮等^[19]、王鹏等^[20]在太湖流域的研究结果一致. 氨氮略有不同,小降雨强度下,氨氮以溶解态迁移为主,而大降雨强度下,其颗粒态迁移量明显增加. 如 040624 暴雨事件中,氨氮迁移质量分数达 56% .

雨量及径流量直接影响土壤侵蚀量. 因此,综合表征为土壤磷素迁移的主要影响因素为降雨径流量. 磷酸盐为磷迁移的主要类型,10 场降雨中其 SMA 值占总磷的 46% ~ 73%,迁移特征与总磷相似.

表 7 不同雨强下磷 SMC 值与 SMA 值变化

Table 7 Variation in the values of SMC and SMA of phosphorus in runoff under different rainfall intensities

指标	磷	小雨 (n = 4)	中雨 (n = 4)	大雨 (n = 4)	暴雨 (n = 4)
SMC/mg · L ⁻¹	总磷	0.05	0.14	0.12	0.18
	磷酸盐	0.03	0.09	0.07	0.08
SMA/g · hm ⁻²	总磷	0.04	7.77	2.99	32.02
	磷酸盐	0.02	5.68	1.94	14.69

2.3.2 不同雨强下磷迁移形态特征

大雨及暴雨事件中磷迁移形态的质量分数见图 3。050430 及 050514 大雨事件中,总磷及磷酸盐主要以溶解态迁移,迁移的质量分数介于 54% ~ 60%; 040624 暴雨事件中,颗粒态磷迁移量明显增加,颗粒态总磷迁移量达 17.9 g/hm^2 ,质量分数占总磷的 63%,颗粒态磷酸盐迁移的质量分数达 82%。这是因为,一方面,强降雨事件造成较大的土壤侵蚀量,

这增大了易黏附在土壤颗粒上磷素输出负荷;另一方面,梅林流域植被覆盖良好,冲刷产生泥沙量小,且流域出口地势比较平坦,土地利用类型主要为稻田,造成地表径流携带的泥沙颗粒沉积于此,减少了颗粒态流失。因此,在降雨强度造成的径流量没有足够大时,该流域磷颗粒态与溶解态迁移量相差不大,而当降雨强度造成足够大的径流量时,磷主要以颗粒态流失,且其迁移量远远大于溶解态。

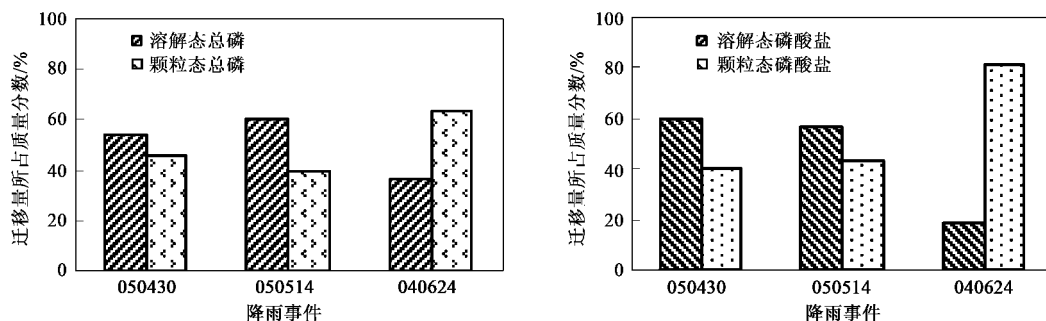


图 3 不同降雨事件中磷迁移形态特征

Fig. 3 Characteristics of transport forms of phosphorus in runoff under different rainfall events

2.4 降雨特征与污染物迁移相关性分析

次降雨量、降雨强度(次降雨平均雨强和小时最大强度)、降雨历时分别代表了降雨径流对农田土壤的冲刷溶解能力、冲刷强度和冲刷时间,是降雨径流污染物形成的重要水文条件^[21]。梅林流域氮、磷迁移量与次降雨量、小时最大雨强、次降雨平均雨强和降雨历时单因子相关分析结果见图 4。可知,农

田土壤氮、磷随地表径流迁移量与小时最大雨强、次降雨量呈显著正相关($R^2 > 0.65$, $p < 0.01$),分别表现为显著对数、线性及指数相关,说明小时最大雨强与次降雨量是土壤氮、磷迁移的主要影响因子。氮、磷迁移量与降雨历时呈线性相关,与次降雨平均雨强没有明显的相关性,说明梅林地区次降雨平均雨强与氮磷迁移无明显的影响。

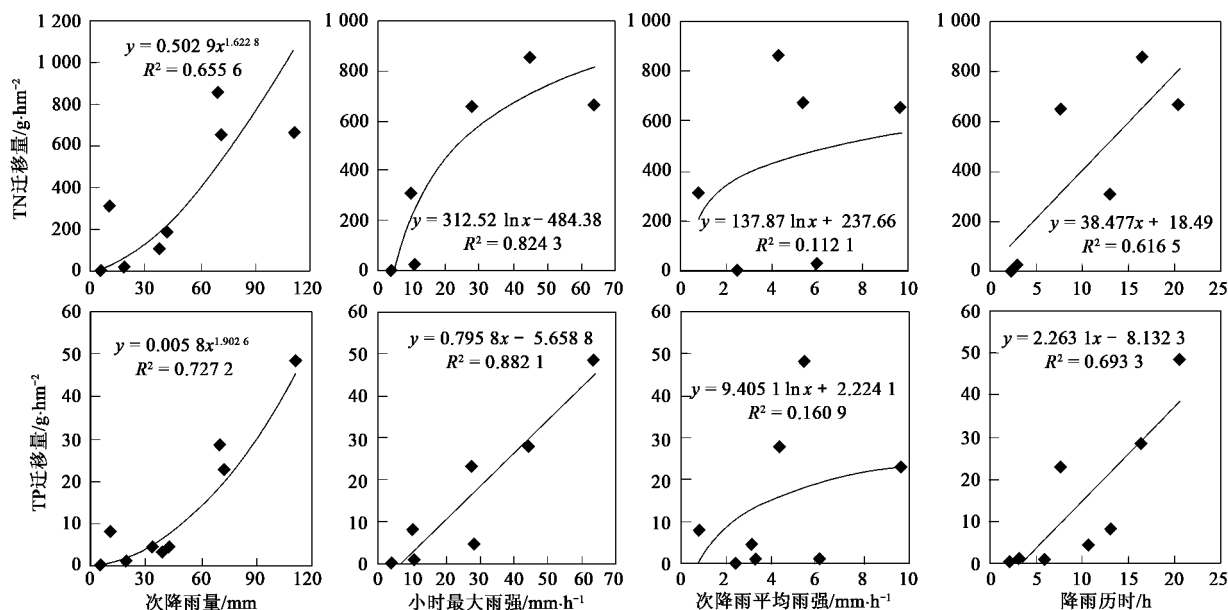


图 4 氮、磷迁移量与降雨特征的相关关系

Fig. 4 Correlation between the mass losses of nitrogen and phosphorus and rainfall characteristics

3 讨论

径流量和表层土壤营养盐含量是农田氮、磷迁移的决定因素,两者缺一不可^[22]. 径流量与降雨密切相关. 研究发现,地表径流的形成主要有 2 个原因^[23],一方面当降雨强度大于土壤下渗速率时形成地表径流(infiltration excess),另一方面当表层土壤含水量达到饱和时形成地表径流(saturation excess). 土壤饱和和扩张形成的地表径流一般发生在频繁的小降雨强度事件中,而强降雨过程往往包括上述 2 种地表产流方式^[24].

Shigaki 等^[25]室内模拟研究发现,雨强为 25、50、75 mm/h 时,磷肥及猪粪撒施 1 d 后径流中 TP 浓度分别达 21.37、29.38、34.39 mg/L(磷肥)及 14.62、19.31、21.86 mg/L(猪粪). Kleinman 等^[22]研究得出随着雨强的增加(29~70 mm/h),径流中溶解态磷和总磷浓度逐渐增加,溶解态磷变化为 0.35~0.7 mg/L,总磷变化为 0.55~0.99 mg/L. 针对雨强对磷迁移形态影响问题,Sharpley 等^[26]研究认为随着雨强及土壤侵蚀量的增加,径流中颗粒态磷含量明显增大. 这是由于随着雨强的增加,一方面土壤侵蚀量增大,颗粒态磷负荷增加;另一方面溶解态磷在径流过程中极易被藻类及水生植物摄取吸收,而颗粒态磷却难被吸收^[27]. 上述研究结果与笔者在梅林流域的结论基本一致. Edwards 等^[28]对草地径流小区降雨模拟试验研究发现,与 50 mm/h 降雨强度相比,100 mm/h 降雨强度下虽然其径流量及土壤侵蚀量更大,但总氮浓度却 < 50 mm/h 降雨事件. 同时, Kleinman 等^[22]也发现硝氮径流浓度与降雨强度呈负相关. 笔者对梅林小流域氮降雨径流研究发现,小雨、中雨降雨强度下,总氮及硝氮径流浓度随雨强的增加而增大;而雨强一旦超过大雨,总氮及硝氮径流浓度与雨强呈负相关. 综合笔者在梅林流域对氮、磷迁移浓度研究结果,说明在梅林流域,小降雨强度时,地表径流形式主要为土壤饱和和扩张,雨强越大,雨滴对土壤可溶组分的冲击越大,地表径流中氮(总氮、硝氮、氨氮及亚硝氮)和磷(总磷、磷酸盐)浓度越高;而强降雨时(雨强超过大雨),一方面其造成更大的土壤侵蚀量,一方面地表径流中掺杂的大量雨水对土壤溶质(N)稀释作用越强,这两方面对氮、磷迁移浓度产生正、反两项作用,对于总氮及硝氮,强降雨时稀释作用占据了主导地位,导致其径流浓度与雨强呈负相关,而对于总磷、磷酸盐及氨氮,强降雨时土壤侵蚀作用占据了主导地位,其径

流浓度仍随雨强的增强而增大.

多数研究发现,在降雨因素中,次降雨量为影响农田养分迁移量的主要因子. 如陈西平等^[29]在涪陵地区对农田径流输出负荷研究发现次降雨量与营养盐单位面积负荷量呈幂指数关系,李定强等^[30]对广东省东江小流域非点源污染物流失研究也得出相似规律. 次降雨量直接反映其对农田土壤的冲刷溶解能力,但却不能反映冲刷强度. 笔者在梅林流域的研究发现,与平均雨强相比,小时最大雨强能更好地代表降雨对土壤的冲刷强度,其与氮、磷迁移量呈现出显著正相关($R^2 > 0.82$, $p < 0.01$). 次降雨量与小时最大雨强可作为评估梅林地区农田氮、磷随地表径流迁移的主要影响因子.

4 结论

(1) 梅林流域,雨强对农田氮、磷径流迁移影响巨大. 总磷、磷酸盐及氨氮 EMC 值随雨强的增强而增大;小降雨强度条件下,总氮、硝氮 EMC 值随雨强的增强而增大,强降雨条件下,其 EMC 值与雨强呈负相关.

(2) 提出多场降雨径流平均迁移量 SMA 概念. 氮、磷 SMA 值与雨强表现出正相关,小雨、中雨、大雨及暴雨条件下,总氮及总磷的 SMA 值依次为 1.91、311.83、127.65、731.69 g/hm² 及 0.04、7.77、2.99 及 32.02 g/hm².

(3) 梅林流域,硝氮及氨氮是氮素迁移的主要类型,且主要以溶解态迁移. 小降雨强度下,磷主要以溶解态迁移,随着雨强的增强,颗粒态磷迁移量逐渐增加,当雨强达到暴雨时,磷以颗粒态迁移为主.

(4) 小时最大雨强与降雨量是氮、磷迁移量的主要影响因素,均表现为正向相关.

致谢:感谢河海大学水文水资源学院崔广柏教授提供的历年监测资料和吴国鞋师傅在梅林试验中的帮助.

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecol Appl*, 1998, 8(3): 559-568.
- [2] Sharpley A N, Menzel R G. The impact of soil and fertilizer phosphorous on the environment [J]. *Adv Agron*, 1987, 41: 297-324.
- [3] 朱萱,鲁纪行,边金钟,等. 农田径流非点源污染特征及负荷定量化方法探讨[J]. *环境科学*, 1985, 6(5): 6-11.
- [4] 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.

- [5] Kwong K F, Bholah A, Voley L, *et al.* Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2002, **91**:147-157.
- [6] 杨具瑞,方铎. 湖泊暴雨径流水质模拟研究[J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(1):37-41.
- [7] 高超,朱继业,朱建国,等. 极端降水事件对农业非点源污染物迁移的影响[J]. *地理学报*, 2005, **60**(6):991-997.
- [8] 梁新强,陈英旭,李华,等. 雨强及施肥降雨间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(6):14-17.
- [9] Castillo V M. Runoff and soil loss to vegetation in a semi-arid environment[J]. *Soil Sci Soc Am*, 1997, **61**:1116-1121.
- [10] Dillaha T A. Vegetative filter strips for agricultural non-point-source pollution control[J]. *Transactions ASAE*, 1989, **32**:513-519.
- [11] 高超,朱继业,朱建国,等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(11):1543-1549.
- [12] 梁涛,王浩,章申,等. 西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J]. *环境科学*, 2003, **24**(2):35-40.
- [13] 高超,张桃林,吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. *环境科学*, 2001, **22**(4):67-71.
- [14] 马立珊,汪祖强,张水铭,等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(1):39-47.
- [15] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- [16] Shelley P E, Driscoll E D, Sartor J D. Probabilistic characterization of pollutant discharges from highway stormwater runoff[J]. *Sci Total Environ*, 1987, **59**(3):401-410.
- [17] Thomson N R, McBean E A, Snodgrass W, *et al.* Sample size needs for characterizing pollutant concentrations in highway runoff[J]. *J Envir Engrg*, 1997, **123**(10):1061-1065.
- [18] 梁涛,张秀梅,章申,等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. *地理学报*, 2002, **57**(4):389-396.
- [19] 段亮,段增强,夏四清. 太湖旱地非点源污染量化研究[J]. *水土保持通报*, 2006, **26**(6):40-43.
- [20] 王鹏,高超,姚琪,等. 环太湖丘陵地区农田氮素随地表径流输出特征[J]. *农村生态环境*, 2005, **21**(2):46-49.
- [21] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10):2287-2293.
- [22] Kleinman P J A, Srinivasan M S, Dell C J, *et al.* Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff[J]. *J Environ Qual*, 2006, **35**:1248-1259.
- [23] Drewry J J, Newham L T H, Greene R S B, *et al.* A review of nitrogen and phosphorus export to waterways: context for catchment modeling[J]. *Mar Freshwater Res*, 2006, **58**:757-774.
- [24] Srinivasan M S, Gburek W J, Hamlett J M. Dynamics of stormflow generation-a hillslope-scale field study in east-central Pennsylvania[J]. *Hydro Pro*, 2000, **16**(3):649-665.
- [25] Shigaki F, Sharpley A N, Prochnow L I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays[J]. *Sci Total Environ*, 2007, **373**(1):334-343.
- [26] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R, *et al.* The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff[J]. *J Environ Qual*, 1992, **21**(1):30-35.
- [27] Sharpley A N. Assessing phosphorus bioavailability in agricultural soils and runoff[J]. *Fertil Res*, 1993, **36**(3):259-272.
- [28] Edwards D R, Daniel T C. Waste management-effects of poultry litter application rate and rainfall intensity on quality of runoff from fescuegrass plots[J]. *J Environ Qual*, 1993, **22**:361-365.
- [29] 陈西平,黄时达. 涪陵地区农田径流污染输出负荷量化研究[J]. *环境科学*, 1991, **12**(3):75-79.
- [30] 李定强,王继增,万洪富,等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **4**(3):12-18.