植物营养与肥料学报 2005,11(6): 731 - 736
Plant Nutrition and Fertilizer Science

太湖流域麦田土壤氮素流失过程的模拟研究

肖 强[1], 张维理[2*], 王秋兵[1], 武淑霞[2]
(1 沈阳农业大学土地与环境学院,辽宁沈阳 110161; 2 中国农业科学院土壤肥料研究所,北京 100081)

摘要: 应用田间模拟降雨,研究了太湖流域稻麦轮作方式下,不同雨强和施氮水平对农田氮素径流流失的影响。结果显示,随施氮量增加,农田径流液中氮素的平均浓度和氮素径流累积流失量提高,两者间呈显著正相关。降雨量相同的条件下,低雨强农田产生径流时间较长,而高雨强引起的农田径流量较高; 低雨强引起的农田氮素径流累积流失量较高,高雨强引起的农田氮素径流累积流失量较低,这种现象在中、高施氮水平条件下更为明显。试验还表明,在降雨量相同的条件下,降雨持续时间长的小雨引起的农田氮素径流流失量要超过降雨持续时间短的大雨。

关键词: 太湖流域; 农田径流量; 模拟降雨; 农田氮素流失量
中图分类号: S153.6+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2005)06-0731-06

Nitrogen losses under simulated rainfall conditions in rice - wheat rotation of Taihu lake watershed plain

XIAO Qiang[1], ZHANG Wei-li[2*], WANG Qiu-bing[1], WU Shu-xia[2]
(*1 Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China; 2 Institute of Soil and Fertilizer, CAAS, Beijing100081, China*)

Abstract: Field trials of rainfall simulation were carried out to study effects of different rainfall intensities and nitrogen fertilizer application rates on nitrogen losses in rice-wheat rotation of Taihu Lake Watershed. It was showed that the mean concentration and accumulated amounts of runoff losses of nitrogen were highly correlated with N-application rates. With same total rainfall, runoff lasted longer under the low rainfall intensity than that under the higher one, but the total runoff amount is more under the higher rainfall intensity. While accumulated amounts of runoff losses of nitrogen under low rainfall intensity is more than that under higher rainfall intensity, which was more obvious with middle and high N-application rates. The experiment indicated that the lower rainfall intensity treatment, lasting longer time, caused more losses amounts of runoff nitrogen than that under the high rainfall intensity with same total rainfall amount.

Key words: Taihu lake watershed; field runoff volume; simulated rainfall; amounts of runoff losses of nitrogen

太湖流域水体富营养化十分严重,而农业面源污染与其有密切联系。70 年代以来,流域农田的氮磷化肥用量逐年增加,施入农田的氮磷养分随降雨径流进入到河流、湖泊,不仅降低了土壤肥力和化肥利用率,并已成为氮磷养分迁出农田系统,进入水体导致水体富营养化的主要途径之一[1]。

人工模拟降雨是了解农田氮磷径流流失规律的重要方法之一。国外一些研究者曾采用模拟降雨研究地表覆盖物、土壤湿度[2]、土壤氮磷水平[3]及施肥状况(时期、数量和种类)[4]对径流氮磷流失量的影响; 研究不同土地利用方式下径流氮磷流失特征特别是对土壤侵蚀的影响[5]; 了解不同肥料种类下,缓冲带对减少农田径流氮磷流失的作用[6]。我国研究者曾采用模拟降雨了解黄土高原水土流失特征[7-8]; 通过室内模拟降雨实验,研究黄土性土壤和华北草甸褐土农田在不同雨强条件下养分流失的规

收稿日期: 2004-05-27　　**修改稿收到日期**: 2005-03-09
基金项目: 农业部重点项目"基本农田保护生态环境调查(1996—2000)";"太湖流域农业面源污染调查(2002—2004)"; 国家科技部 973 项目(G1999011806, 2002CB410800); 科技部专项(2004—2005); 国家科技攻关计划(2004—2005, 2004BA516A02—04, 2004—2006, 2004BA520A13—8)资助。
作者简介: 肖 强(1978—),男,辽宁人,硕士,主要从事农业面源污染方面的研究。* 通讯作者
本研究工作在农业部植物营养与养分循环重点实验室完成。

律。太湖流域为我国典型的南方水网平原,地势低平,降雨量高而雨季持续时间长,农田水土流失特征和农田对径流引起的氮素流失过程与丘陵地区和非水网平原的农区有很大区别。为了解这一环境条件下降雨对径流氮磷流失的影响,应用田间模拟降雨实验,研究了不同雨强和施氮量对农田径流量、径流液中氮浓度、农田氮素径流流失量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验处理

试验设在中国科学院常熟生态站。为平原稻麦轮作区,土壤类型为囊水型水稻土。土壤的基本性状见表1。试验在2002年11月初收获水稻之前套种小麦。整个麦季氮肥处理分为3个水平,各处理均分两次(基肥与追肥)施入。基肥时间为2002年11月24日,追肥为2003年3月4日。追肥氮肥品种为尿素,每个氮肥处理设3次重复(表2)。

模拟降雨试验采用3种雨强(表3),于2003年3月7日~9日进行。每个小区长6m,宽5m,面积为30m²。每个小区内有排水沟,有专门的径流池收集径流,径流出口按照当地的习惯,下端距地表10cm。小区之间有田埂相隔。为防止不同施肥处理小区之间水分和养分发生侧渗和串流,小区四周用塑料布沿田埂竖直向下埋,深约0.8m。N1、N2、N3水平的模拟降雨不同雨强没有重复。

试验地从2000年~2003年进行了3年稻麦轮作方式下径流监测试验(试验处理见表2,高、低处理对应小区不变)。

表1 供试土壤的基本性状

Table 1 Basic properties of soil

土层深度 Depth (cm)	机械组成 (g/kg) Particle composition			有机质 Organic matter (g/kg)	孔隙度 Soil porosity (%)	结构系数 Structural index (%)	pH (H_2O)	全N Total N	全P Total P	全K Total K	有效磷 Avail.P (mg/kg)
	>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm					(g/kg)			
0—15	229.6	427.1	343.3	35.5	53.8	89.23	7.62	1.96	1.0	19.4	6.73
15—30	180.8	415.7	403.5	31.4	48.3	85.66					
30—50	170.8	403.6	425.6	20.3	48.9	60.3					
50—70	191.0	343.5	465.5	17.1	46.0	58.93					

表2 试验氮素处理水平

Table 2 Nitrogen treatments in field experiments

2002~2003冬小麦施氮处理(kg/hm²) N application for winter wheat in 2002 to 2003					试验前期施氮处理 N rate before experiment (kg/hm²)				
处理 Treat.	施氮量 N rate	施肥 Fertilization BD	施肥 Fertilization TD	n	2000yr 水稻 Rice	2000~2001yr 冬小麦 Winter wheat	2000yr 水稻 Rice	2000~2001yr 冬小麦 Winter wheat	2002yr 水稻 Rice
N1	100	50	50	3	300	180	300	180	225
N2	200	100	100	3	300	180	300	180	300
N3	400	200	200	3	300	180	300	180	375

注(Note): N1为当地最低施肥量 Local lowest N-application rate; N2为当地平均施肥量 Local average N-application rate; N3为当地最高施肥量 Local highest N-application rate; BD: 基肥 basal dressing; TD: 追肥 Top dressing.

表3 模拟降雨情况

Table 3 Circs of simulated rain

雨强 Rainfall density (mm/min)	程度 Grade	降雨时间 Duration (min)	降雨量 Rainfall (mm)
0.67	低 Low	60	40
1.33	中 Middle	30	40
2.50	高 High	16	40

1.2 模拟降雨装置系统

人工模拟降雨试验器材主要包括降雨装置、取样装置。降雨装置整体构架长6m,宽5m,高2m,受雨面积为30m²,主要由供水系统、动力系统和降雨组件构成。供水系统:模拟降雨雨水来源于自来水蓄水池(水中铵态氮浓度为0.015mg/L,硝态氮为0.08mg/L之间,总氮为0.1mg/L以下,处理所用径流数据都已扣除此浓度),水通过抽水泵,由导水管

引至降雨主要组件旋转延伸管，每个延伸管上有 3 个喷头，不同孔径的喷头可以控制雨强。动力系统：主要由转速控制器、电动机、动力臂以及旋转延伸管组成。降雨组件：主要包括承力架、旋转轴、彩条布等。径流取样装置：径流管、水桶等(图 1)。此降雨器的降雨喷头为十字水平对称排列，降雨时旋转器匀速旋转，降雨面呈锥形，试验田各处受雨均匀(已标定，此仪器由南京农业机械化研究所制造)。

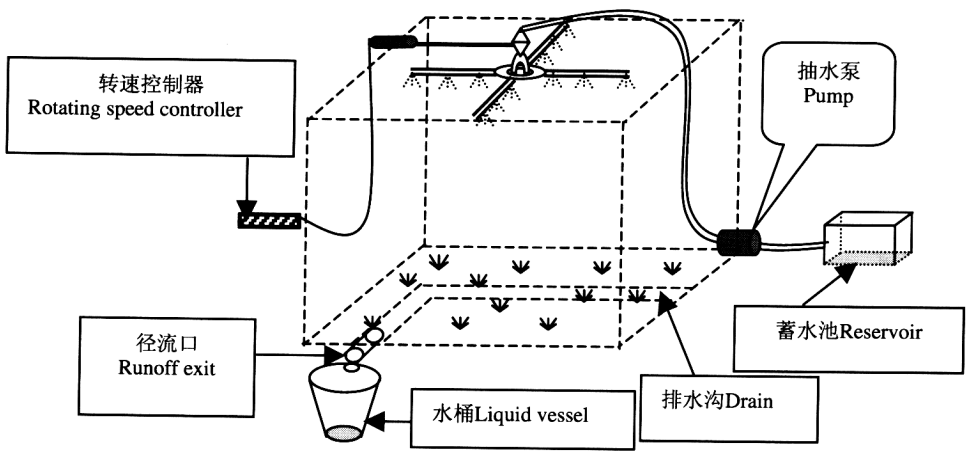

图 1　模拟降雨设备示意图

Fig.1　Diagrammatic drawing of simulated rainfall equipment

1.3　采样和分析测定

在降雨过程中，会有一些大的土粒随径流流出来，如果不加以分离分别测定，会影响水样中氮素的测定结果。分离所用的筛子筛孔过小，径流水不易透过，而且，先前的研究显示，径流当中所携带的颗粒态的磷约 80% 以上集中在 0.1mm 以下[9]。因此，采用过 0.1mm 的筛子将一些大的土粒分离出来。取 150mL 径流水样进行分析，径流氮素形态见(表 4)。大土粒全氮土壤样本自然风干，称重，凯氏法测定。径流液总氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法(GB11894-89)，铵态氮采用靛酚蓝比色法(GB/T8538-1995)，硝态氮采用紫外分光光度法。水样的保存方法：水样取回后一般立即测定，少量不能测定的，滴加硫酸并冰冻保存。5d 内测样完毕。

表 4　径流氮素形态

Table 4　Forms of runoff nitrogen

径流流出总氮 N runoff	大土粒氮 + 径流液总氮 Soil particle N and total nitrogen in runoff after sieve by 0.1mm
大土粒氮 Soil particle N	>0.1mm 土粒所含有的氮 N of soil particles of >0.1mm in diameter
径流液总氮 TN in runoff liquor	过筛后径流液总氮 Total nitrogen in runoff after sieve by 0.1mm
硝态氮 NO_3^- - N in runoff liquor	过筛后径流液硝态氮 NO_3^- - N in runoff after sieve by 0.1mm
铵态氮 NH_4^+ - N in runoff liquor	过筛后径流液铵态氮 NH_4^+ - N in runoff after sieve by 0.1mm

2　结果与讨论

2.1　径流氮素不同形态比较

不同形态氮在径流液中的比重见表 5。其中大土粒氮量(直径 >0.1mm 土粒流失的全氮量)在径流流出总氮的比例，最小值为 0.16%，最大值为 2.32%，与雨强及施氮量均无相关性。径流流出总氮中占很大比重的为通过 0.1mm 筛子的径流液总氮。因此在分析农田径流氮流失规律时不考虑大土粒氮量。硝态氮与铵态氮占径流流出总氮的比例，其平均值为 55.25%，考虑到追施尿素之后 3d 即进行人工模拟降雨，径流液中总氮将有很大一部分为水溶性尿素或酰胺态氮。

2.2　径流量和径流时间

一次降雨过程 3 种雨强下累积径流量随产流时间的变化见图 2。降雨量相同的条件下，雨强越高，

表5 不同形态氮在径流液中所占比重

Table 5 Proportion of different nitrogen forms in runoff

径流流出总氮 N runoff	平均值 Average (%)	变化范围 Change range (%)
大土粒氮 Soil particle N	1.28	0.16～2.32
TN	98.72	97.68～99.84
NO_3^--N	36.15	23.65～51.58
NH_4^+-N	19.10	6.04～30.90
NO_3^--N + NH_4^+-N	55.25	29.69～82.48

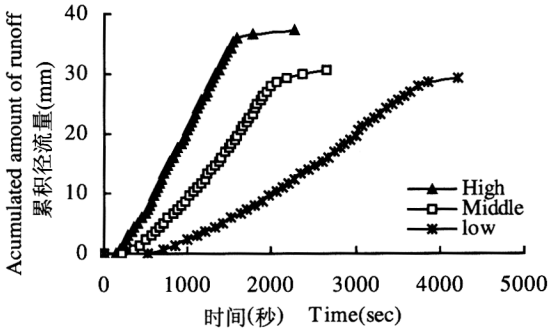

图2 一次降雨过程3种雨强下累积径流量随产流时间变化

Fig.2 Change of accumulated runoff volume with time under three rainfall intensities during a rainfall

(High 指高雨强 High rainfall intensity; Middle 指中雨强 Middle rainfall intensity; Low 指低雨强 Low rainfall intensity)

径流总量高；降雨时间越短，产流速率越高。产流时间短，即降雨形成的径流液与土壤接触、反应时间较短。每种雨强下的累积径流量曲线都有一个拐点，在拐点之前，曲线斜率大，径流速率快，单位时间内产生的径流量多。在拐点之后，则相反。

2.3 雨强对径流液氮素浓度及流失量的影响

图3显示了3种雨强对径流液总氮平均浓度及累积流失量的影响。尽管由于没有重复，不能进行多因素的方差分析，但从图3仍可看出，随雨强增强，径流液总氮的平均浓度及累积流失量的趋势降低。表6可看出，相同施氮量下，降雨产流过程中径流液总氮平均浓度与雨强呈显著负相关（P = 0.01）。说明雨强越高，降雨形成的径流液与土壤接触的越不充分，反应的时间越短，因此径流液中TN平均浓度越低。此外，低雨强引起的农田氮素径流累积流失量较高，高雨强引起的农田氮素径流累积流失量较低，这种现象在中、高施氮水平条件下更为明显。

2.4 施氮量对径流液总氮浓度及累积流失量的影响

图4显示了施氮量对径流液总氮平均浓度及流失量的影响。图5为相同降雨量、3种雨强、3种施氮量下，径流液总氮累积流失量随时间的变化过程。

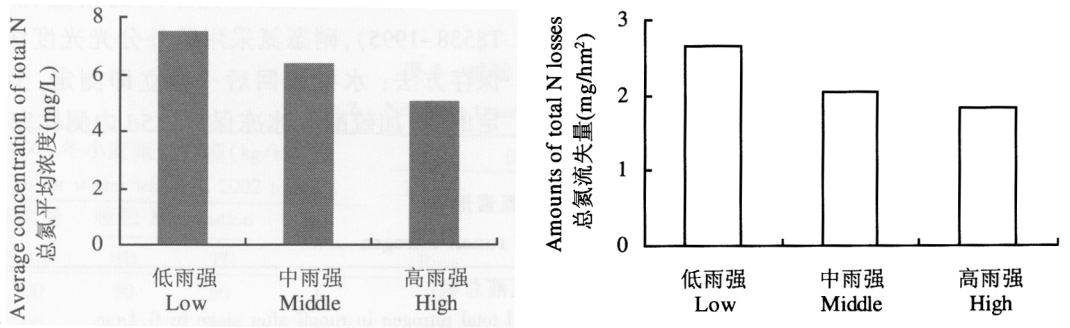

图3 雨强对径流液总氮的平均浓度及流失量的影响

Fig.3 Effect of rainfall intensities on amounts and average concentration of TN in runoff liquor

表6 施不同氮量和雨强下径流液总氮的平均浓度及流失量

Table 6 Amounts and average concentration of TN in runoff liquor under different rainfall intensities and N rates

项目 Item	施氮量 N rates (kg/hm²)								
	50			100			200		
	雨强 Rainfall intensities			雨强 Rainfall intensities			雨强 Rainfall intensities		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
总氮平均浓度(mg/L) TN average concentration	4.49	3.8	3.28	7.29	5.93	4.11	10.81	9.34	7.81
总氮流失量(g/hm²) Amounts of TN losses	1548	1115	1155	2566	1828	1417	3883	3221	2922

L为低雨强 Low rainfall intensity; M为中雨强 Middle rainfall intensity; H为高雨强 High rainfall intensity

径流液总氮平均浓度及累积流失量均随施氮水平的增加而增加，与施氮量呈显著正相关（$P = 0.01$）。径流液总氮累积流失量主要受农田径流产流过程的影响，农田径流液氮素流失过程曲线与农田累积径流量曲线接近（图 2）。

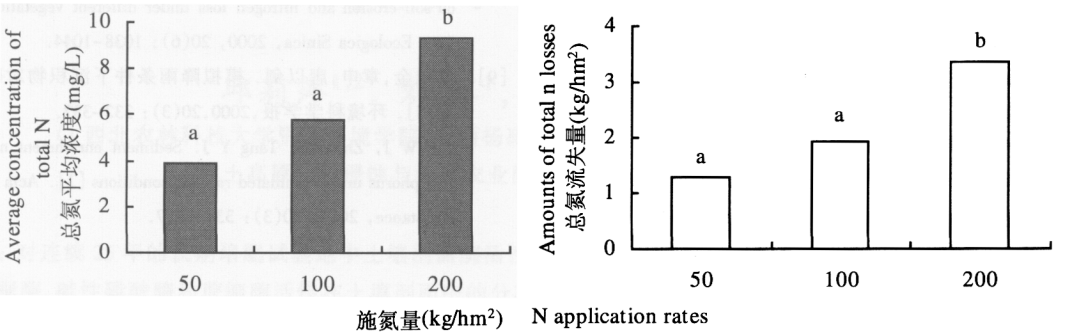

图 4　施氮量对径流液总氮平均浓度及流失量的影响

Fig.4　Effect of N－application rates on amounts and average concentration of TN in runoff liquor

（不同字母表示差异在 0.05 显著水平，下同。Different litters mean significant at 0.05 level, same as follows）

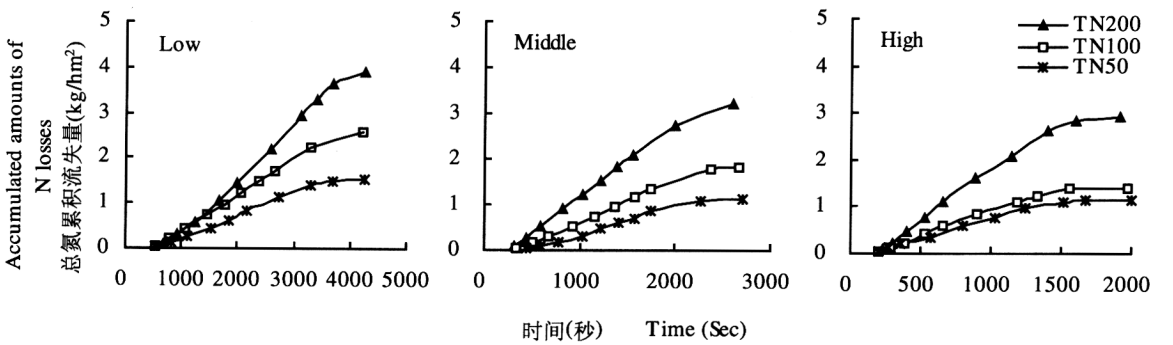

图 5　相同降雨量、3 种雨强、3 种施氮量下径流液总氮累积流失量随时间的变化

Fig.5　Change of accumulated amounts of TN in runoff liquor under same rainfall amount and different rainfall intensities and N rates

3　小结

本试验结果表明，相同降雨量、雨强条件下，径流液总氮的平均浓度及累积流失量与施氮量呈显著正相关。径流液总氮累积流失量在产流初始阶段直线上升，之后增长速率减缓。相同降雨量条件下，低雨强引起的农田氮素径流累积流失量较高，高雨强引起的农田氮素径流累积流失量较低，此现象在中、高施氮水平条件下更为明显。

雨强越大，降雨时间越短，产流速率越高；产流时间越短，径流总量越高，降雨形成的径流液与土壤接触、反应时间越短。大于 0.1 mm 土粒所带走的氮量占径流流出总氮的比例很小（<3%）。

参 考 文 献：

[1]　黄满湘，章申，唐以剑，陈喜保．模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]．土壤与环境．2001，10(1)：6-10.
Huang M X, Zhang S, Tang Y J, Chen X B. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. Soil and Environmental Sciences. 2001, 10(1): 6-10.

[2]　Torbert H A, Potter K N, Hoffman D W *et al*. Surface residue and soil moisture affect fertilizer loss in simulated runoff on a heavy clay soil [J]. Agronomy Journal, 1999, 91: 606-612.

[3]　Andraski T W, Bundy L G. Relationships between phosphorus levels in soil and in runoff from corn production systems[J]. J. Environ. Qual., 2003, 32: 310-316.

[4]　Shuman L M. Phosphorus and nitrate nitrogen in runoff following fertilizer application to turfgrass [J]. J. Environ. Qual., 2002, 31:1710-1715.

[5] Schlesinger W H, Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico: Ⅰ. Rainfall simulation experiments[J]. Biogeochemistry, 1999, 45: 21-34,

[6] Heathwaite A L, Griffiths P, Parkinson R J. Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures[J]. Soil Use and Management, 1998, 14: 142-148.

[7] 傅伯杰,马克明,周华峰,等. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报,1998,43(22): 2444-2447.
Fu B J, Ma K M, Zhou H F *et al*. The influence of land using structure on the distribution of soil nutrient in loess hill area [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(22): 2444-2447.

[8] 张兴昌,邵明安,黄占斌,卢宗凡. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报,2000,20(6): 1038-1044.
Zhang X C, Shao M A, Huang Z B, Lu Z F. An experimental research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 1038-1044.

[9] 晏维金,章申,唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报,2000,20(3): 332-337.
Yan W J, Zhang S, Tang Y J. Sediment enrichment mechanisms of phosphorus under simulated rainfall conditions [J]. Acta scientific circumstance, 2000, 20(3): 332-337.