

自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究

焦平金¹, 许迪¹, 王少丽¹, 王友贞², 汤广民²

(1.中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2.安徽省水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要:基于淮北平原自然降雨条件下2个连续汛期观测的降雨-径流试验数据,分析不同试验处理下农田地表产流规律和氮磷浓度及其构成,探讨地表径流氮磷浓度和流失量的时间变化过程及其分布差异。结果表明,当地农田地表径流氮磷浓度构成分别以颗粒态氮和可溶性磷为主,而可溶性氮中又以溶解性有机氮为主,且硝态氮是农田地表径流无机氮流失的主要成分。汛初7月不同土地利用方式下农田地表径流量及铵态氮、硝态氮、可溶性氮磷和颗粒态氮磷的浓度及流失量间的差异相对较小,但8月期间的差异却明显增加,低秆高密度作物种植模式下的相应流失量最低。在淮北平原夏季种植黄豆、棉花等矮秆高密度作物,可起到有效减少地表径流氮磷流失量的作用,减缓因农业非点源污染对地表水体富营养化产生的潜在威胁。

关键词:自然降雨;农田;作物;径流;氮磷流失

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0534-07

Nitrogen and Phosphorus Runoff Losses from Farmland Under Nature Rainfall

JIAO Ping-jin¹, XU Di¹, WANG Shao-li¹, WANG You-zhen², TANG Guang-min²

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2.Anhui Water Resources Research Institute, Bengbu 233000, China)

Abstract: Following the field rainfall-runoff plot experiments in 2007 and 2008 in Huaibei plain, this paper analyzed the temporal variation of surface runoff and various forms of nitrogen and phosphorus from 4 land uses. The results showed that the particulate nitrogen and dissolved phosphorus were the main forms of nitrogen and phosphorus in surface runoff and the dissolved organic nitrogen and nitrate-N were the main dissolved nitrogen and inorganic nitrogen respectively. Concentrations and losses of ammonium-N, nitrate-N, dissolved nitrogen and phosphorus, and particulate nitrogen and phosphorus in surface runoff were generally low in July, while the differences among 4 land uses increased obviously in August and the losses from cotton and soybean plots were the lowest. Thus, the crops such as cotton and soybean, which were dwarf and compact planted, played an important role in alleviating the agricultural non-point source pollution.

Keywords: natural rainfall; farmland; crop; surface runoff; nitrogen and phosphorus losses

农业土壤氮磷随径流流失导致地表水体富营养化,并加速水环境的进一步恶化,其引起的一系列环境、经济问题已引起国内外极大关注^[1-3]。土壤氮磷随地表径流迁移的科学研究大都基于室内土槽、田间小区、流域尺度开展,且这3种尺度在揭示径流水文过程及氮磷流失规律方面皆有其自身优势^[4-6]。然而由于土壤和降雨条件与自然状况的差异较大而限制了土槽尺度成果的应用,流域监测方法不能考察特定因素的

影响。田间试验则易于重复考察多种因素,且避免破坏土壤结构和改变水文过程^[7],故田间试验在研究氮磷随地表径流流失机理方面具有明显优势。现有土壤氮磷地表径流流失机理与规律的研究多在模拟降雨或坡面产流条件下开展^[8-10]。为此,基于特定水文气候条件、土地利用方式、土壤特性等影响因素,开展自然降雨条件下地表坡度较为平缓的农田地表径流氮磷流失规律研究,对减缓农业非点源污染具有重要意义和实用价值^[11-12]。本文基于安徽淮北平原2个汛期观测的降雨-径流田间小区试验数据,分析不同试验处理下农田地表产流规律和地表径流氮磷浓度及其构成,探讨地表径流氮磷浓度和流失量的时间变化规律及其分布差异,为当地减少农田氮磷径流流失量提供科学依据。

收稿日期:2009-07-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50639040,50739003);中国水利水电科学研究院科研专项(节集 0809)

作者简介:焦平金(1980—),男,安徽人,在职博士生,主要从事农田排水与水环境保护方面的研究。E-mail:jiaopj@iwhr.com

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区地处安徽淮北平原的安徽省水利科学研究院新马桥农水综合试验站,位于东经 117°22',北纬 33°09',属暖温带半湿润季风气候区。当地年均降水量 911.3 mm,降水主要集中在 6—9 月的汛期,约占全年总降水量的 60%~70%,年均降雨-径流深 240.2 mm,年均气温和蒸发量分别为 15.0 ℃和 916.7 mm。当地主要种植冬小麦、大豆、玉米、棉花等作物,汛期地下水埋深 0~1.6 m,供试土壤为砂浆黑土,土壤质地以重壤土为主。表土的主要理化性质如表 1 所示。

1.2 田间试验设计

根据当地主要作物种植类型,分别设置玉米、棉花、大豆 3 种典型作物及裸地 4 种土地利用方式,各土地利用方式下分别布设 3 个试验小区。每个试验小区的面积 5 m×2 m,田面平均坡度 2‰,作物顺坡平作。于 2007—2008 年汛期,开展为期 2 年的降雨-径流小区田间试验。在播种玉米和大豆及移栽棉花前,整理田块一次性撒施底肥,无追肥。作物播种和施肥管理措施参考当地习惯(表 2)。2007 年汛期的降雨量 1 015.3 mm,为丰水年份,其间观测到 5 次明显的暴雨-径流过程(表 3),其中前 3 次发生在 7 月上旬作物苗期,第 4 次发生在 7 月下旬玉米拔节期、棉花蕾期和大豆分枝期,第 5 次出现在 8 月下旬玉米抽雄期、棉花花龄期和大豆花荚期;2008 年汛期的降雨量 491.3 mm,为枯水年份,仅在玉米抽雄期、棉花花铃期和大豆花荚期的 8 月 17 日产生 1 次较大的暴雨-径流过程(表 3)。

各试验小区三侧设置高 20 cm 土埂,采用塑料薄膜包被,以减少小区间的侧渗与串流。在每个试验小区出口一侧,经地面导水槽与地表径流收集池相连,且在降雨期间,利用挡雨设施将径流收集池与导水槽遮盖,防止雨水进入。

1.3 试验观测与测试方法

1.3.1 试验观测方法

利用自记式雨量计观测降雨过程,采用容积法监测地表径流量。使用容积 500 mL 的塑料瓶,采集各次

表 2 作物播种和施肥管理措施

Table 2 Crop planting and fertilizer application

试验处理	作物品种	播种方式	种植密度/ hm ⁻²	底肥施用量/kg·hm ⁻²		
				施氮	施磷	施钾
裸地	—	—	—	0	0	0
棉花	9901 优系	垄顶移栽	40 000 株	228	90	90
玉米	郑单 958	人工穴播	42 000 株	114	45	45
大豆	中黄 13	人工条播	150 kg	45	45	45

表 3 降雨特征

Table 3 Rainfall characteristics

产流日期	当日降雨量/mm	前 5 日降雨量/mm
2007 年 7 月 6 日	76.5	63.3
2007 年 7 月 7 日	50.5	155.8
2007 年 7 月 8 日	60.2	182.5
2007 年 7 月 20 日	129.6	27.2
2007 年 8 月 22 日	122.7	0
2008 年 8 月 17 日	55.7	99.6

径流期间的混合水样,利用紫外可见分光光度计(T6 新世纪)测试地表径流不同形态的氮磷浓度,确定相应的氮磷流失量。

1.3.2 试验测试方法

采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定径流水样总氮(TN)的浓度,在对水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,分别采用纳氏试剂比色法、酚二磺酸分光光度法和碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定铵态氮 NH₄⁺-N、硝态氮 NO₃⁻-N 和可溶性氮 DN 的浓度,颗粒态氮 PN 的浓度由总氮与可溶性氮的浓度之差获得。采用钼酸铵分光光度法测定径流水样总磷(TP)的浓度,在对水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,测定可溶性磷(DP)的浓度,颗粒态磷(PP)的浓度由总磷与可溶性磷的浓度之差获得。

2 结果与讨论

2.1 农田地表产流时间变化过程

图 1 给出 2007—2008 年 2 个汛期内 6 次典型降雨产流下的雨强-历时曲线,其中 2007 年 8 月 22 日不同历时的最大平均雨强明显高于其他降雨过程,其次为 2007 年 7 月 20 日,而其余 4 次降雨不同历时的

表 1 供试土壤基本理化性质(0~20 cm)

Table 1 Physical and chemical properties of surface soil(0~20 cm)

不同粒径土壤颗粒含量/%					容重/g·cm ⁻³	全氮/%	全磷/%	全钾/%	有机质/%
2.5~0.5 mm	0.5~0.1 mm	0.1~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.01 mm					
0~8	39~50	7~14	6~14	26~42	1.36	0.102	0.131	1.54	1.19

最大平均雨强间的差异并不明显。2007—2008 年 2 个汛期田间试验小区内 4 种土地利用方式下农田地表径流深度时间变化过程及其分布差异如图 2 所示,各种土地利用方式在农田地表径流深度上的差异性在 2007 年 7 月总体上并不明显,进入 8 月份受地表植被覆盖程度不同的影响出现明显差异,裸地的径流深度最大,大豆作物的径流深度最小,玉米和棉花作物的径流深度差异不明显。农田地表产流量与降雨量、降雨强度、降雨类型、前期雨量等水文因素密切相关,2007 年 7 月 6—8 日 3 次较小的产流量与其较低的降雨量和雨强有关,虽然 7 月 6 日的降雨量略大,但与随后 2 d 的降雨相比,降雨为间歇 7 h 左右的双峰型,持续时间较长,并且为入夏以来首场较大的降雨,除前期雨量外,本次降雨尚有部分雨量补充了土壤水库。2007 年 8 月 22 日与 7 月 20 日的降雨相当,但径流量小于后者,其原因归结于前期相对较长时间未降雨,土壤较为干燥,能容纳较多的雨水,并且该次降雨过程虽然雨强较大,但为间歇式多峰雨型,持续时间较长。

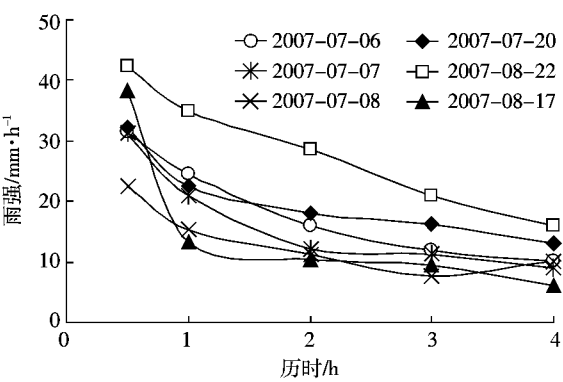


图 1 不同降雨产流下的雨强-历时曲线

Figure 1 Relationships between rainfall intensity and duration

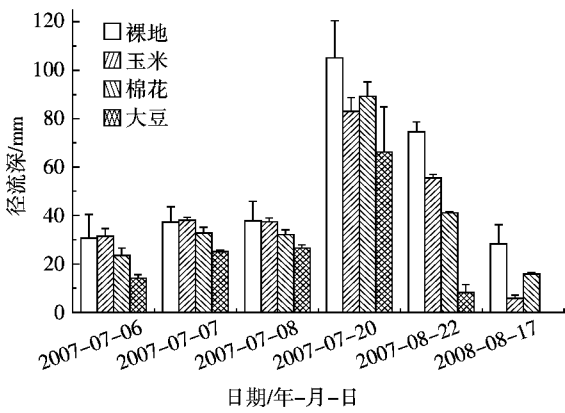


图 2 农田地表径流深度时间变化过程及其分布差异

Figure 2 Variation of surface runoff with time for 4 land uses

2.2 地表径流氮磷浓度及其构成

2.2.1 地表径流氮磷浓度

表 4 和表 5 分别显示出 2007—2008 年 2 个汛期田间试验小区内 4 种土地利用方式下农田地表径流不同形态氮磷浓度观测值的统计分析结果,包括中位值 Med、最大值 Max 和最小值 Min。与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[13] Ⅲ类水中规定的铵态氮和可溶性氮浓度限值 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比,不同试验处理下的农田地表径流铵态氮浓度皆小于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且 55.6%~72.2%的可溶性氮浓度低于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,除玉米和棉花的最大值外,各种试验处理下的可溶性磷浓度皆低于规定的Ⅲ类水限值 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同作物覆盖下农田地表径流颗粒态氮磷和可溶性磷浓度的中值皆明显低于裸地,而铵态氮、硝态氮和可溶性氮浓度的中值大都高于或等于裸地(表 4 和表 5),这表明作物覆盖可有效减少农田地表径流中易吸附于侵蚀土壤上的氮磷量,而略微增加溶解性氮的浓度。另一方面,玉米作物覆盖下农田地表径流不同形态氮磷浓度的中值大多高于棉花和大豆,而棉花和大豆间的差异却较小,这意味着种植棉花和大豆这类低秆高密度作物可有效降低降雨-径流对表土颗粒的侵蚀作用,减少农田地表径流不同形态的氮磷浓度。

表 4 各种试验处理下农田地表径流不同形态氮素浓度观测值统计结果

Table 4 Concentrations of various nitrogen forms in runoff for 4 land uses

试验处理	$\text{NH}_4\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{NO}_3\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{DN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{PN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
裸地	0.02	0.27	0.00	0.14	0.86	0.00	0.74	1.85	0.24	1.57	3.84	0.51
玉米	0.02	0.42	0.00	0.23	0.66	0.09	0.93	1.67	0.45	1.08	2.82	0.15
棉花	0.02	0.29	0.00	0.14	1.16	0.02	0.83	1.62	0.37	0.92	1.92	0.25
大豆	0.02	0.74	0.00	0.11	1.49	0.00	0.83	2.44	0.16	1.03	2.09	0.15

表 5 各种试验处理下农田地表径流不同形态磷素浓度观测值统计结果

Table 5 Concentrations of various phosphorus forms in runoff for 4 land uses

试验处理	$\text{DP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{PP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min
裸地	0.060	0.181	0.020	0.027	0.530	0.007
玉米	0.027	0.330	0.000	0.025	0.310	0.006
棉花	0.034	0.330	0.000	0.021	0.560	0.002
大豆	0.022	0.146	0.001	0.022	0.074	0.003

2.2.2 地表径流氮磷浓度构成

表 6 和表 7 分别给出 2007—2008 年 2 个汛期田间试验小区内 4 种土地利用方式下农田地表径流不同形态氮磷浓度构成比例的统计分析结果。裸地下农田地表径流颗粒态氮占总氮(PN/TN)比例的中值皆明显高于作物处理,而不同作物处理间的差异不明显。在径流可溶性氮中硝态氮中值的比例均明显高于铵态氮的相应值,且两者之和多低于 50%,其中裸地和玉米处理下 $\text{NO}_3^-/\text{N}/\text{DN}$ 的中值高于棉花和大豆(表 6)。这表明,不同土地利用方式下农田地表径流颗粒态氮浓度均高于可溶性氮,裸地下的颗粒态氮含量最高,而可溶性氮中又以溶解性有机氮为主,硝态氮是农田地表径流无机氮流失的主要成分^[14],这在裸地和高秆玉米作物下更为明显。另一方面,各种试验处理下农田地表径流可溶性磷占总磷(DP/TP)比例的中值要高于颗粒态磷占总磷(PP/TP)比例的相应值^[15],大豆作物的 DP/TP 中值最大,PP/TP 中值最小(表 7),该土地利用方式对减少农田地表径流颗粒态磷流失的作用明显。

表 6 各种试验处理下农田地表径流不同形态氮素浓度构成比例的统计结果

Table 6 Concentration component of various nitrogen forms in runoff for 4 land uses

试验处理	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{DN}/\%$			$\text{NO}_3^-/\text{N}/\text{DN}/\%$			$\text{DN}/\text{TN}/\%$			$\text{PN}/\text{TN}/\%$		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
裸地	3.5	19.3	0.0	33.2	100.0	0.0	33.9	48.3	9.1	66.1	90.9	51.7
玉米	2.8	39.1	0.0	33.3	57.8	9.7	44.5	85.9	29.3	55.5	70.7	14.1
棉花	3.5	18.6	0.0	17.4	94.2	2.3	47.2	75.2	20.7	52.8	79.3	24.8
大豆	2.8	37.0	0.0	13.9	61.0	0.0	44.8	94.2	21.9	55.2	78.1	5.8

表 7 各种试验处理下农田地表径流不同形态磷素浓度构成比例的统计结果

Table 7 Concentration component of various phosphorus forms in runoff for 4 land uses

试验处理	$\text{DP}/\text{TP}/\%$			$\text{PP}/\text{TP}/\%$		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min
裸地	59.7	90.4	10.2	40.3	89.8	9.6
玉米	52.4	79.1	0.0	47.6	100.0	20.9
棉花	53.0	94.6	0.0	47.0	100.0	5.4
大豆	68.7	93.7	2.5	31.3	97.5	6.3

2.3 地表径流氮磷流失的时间变化

2.3.1 地表径流氮磷浓度

图 3 和图 4 分别给出 2007—2008 年 2 个汛期田间试验小区内 4 种土地利用方式下农田地表径流不

同形态氮磷浓度的时间变化过程及其分布差异。如图 3 所示,不同土地利用方式下农田地表径流铵态氮、硝态氮、可溶性氮和颗粒态氮浓度间的差异性在 2007 年 7 月期间总体上并不明显,但进入 8 月份则在铵态氮和硝态氮径流浓度上出现显著差异,而可溶性氮和颗粒态氮径流浓度上的差异仍不显著,此时段内大豆作物下农田地表径流铵态氮、硝态氮和可溶性氮浓度相对较高。同比 2007—2008 年 8 月份的观测数据可以看出,2008 年 8 月观测的农田地表径流铵态氮、硝态氮和可溶性氮浓度明显低于 2007 年的相应值,而颗粒态氮浓度则相反,这是由于前者的当日降雨量(表 3)和最大平均雨强(图 1)均明显低于后者所至,干旱少雨导致各种试验处理下农田地表径流铵态氮、硝态氮和可溶性氮浓度明显降低。另一方面,不同土地利用方式下的农田地表径流可溶性磷和颗粒态磷浓度的时间变化趋势也大体呈现出 2007 年 7 月内总体差异不显著而在 8 月份却较为显著的特点(图 4),且裸地下地表径流可溶性磷和颗粒态磷浓度均为最高,而不同作物处理间的差异并不显著。同比可以发现,2008 年 8 月的农田地表径流颗粒态磷浓度明显高于 2007 年相应值,而可溶性磷浓度在年际间的变化并不明显。

农田地表径流不同形态氮磷浓度随时间变化是当地水文气候、作物种植模式和土壤属性共同作用下的结果^[11]。在 2007 年 7 月期间,连续 4 次的降雨-径流使得大量表土氮磷被淋洗到下层土壤,进入 8 月份后的高温将导致与氮磷转化相关的土壤微生物活性增大,通过矿化、硝化以及有机磷分解等作用可及时补充土壤流失的氮磷数量,使表土氮磷在高强度暴雨作用下形成地表径流流失的可能性增大,故 2007 年 8 月份观测的农田地表径流铵态氮、硝态氮、可溶性氮磷的浓度达到最高,这与氮素地表径流流失主要发生在大暴雨期间的结果相一致^[16]。由于土壤颗粒态氮磷含量主要受降雨溅蚀与径流侵蚀作用的影响,尽管降雨随时间变化较大,但高强度的降雨大都发生在作物覆盖程度较高的时段,明显减少了降雨-径流过程对表层土壤颗粒态氮的侵蚀,故农田地表径流颗粒态氮磷含量随时间的变化较小。此外,由于 2008 年汛期的降雨产流次数远低于 2007 年,地表氮磷富集系数较高的土壤颗粒含量相对较高,致使 2008 年 8 月观测的土壤颗粒态氮磷浓度较 2007 年同期相比有所增加。

2.3.2 地表径流氮磷流失量

图 5 和图 6 分别给出 2007—2008 年 2 个汛期田间试验小区内 4 种土地利用方式下农田地表径流不

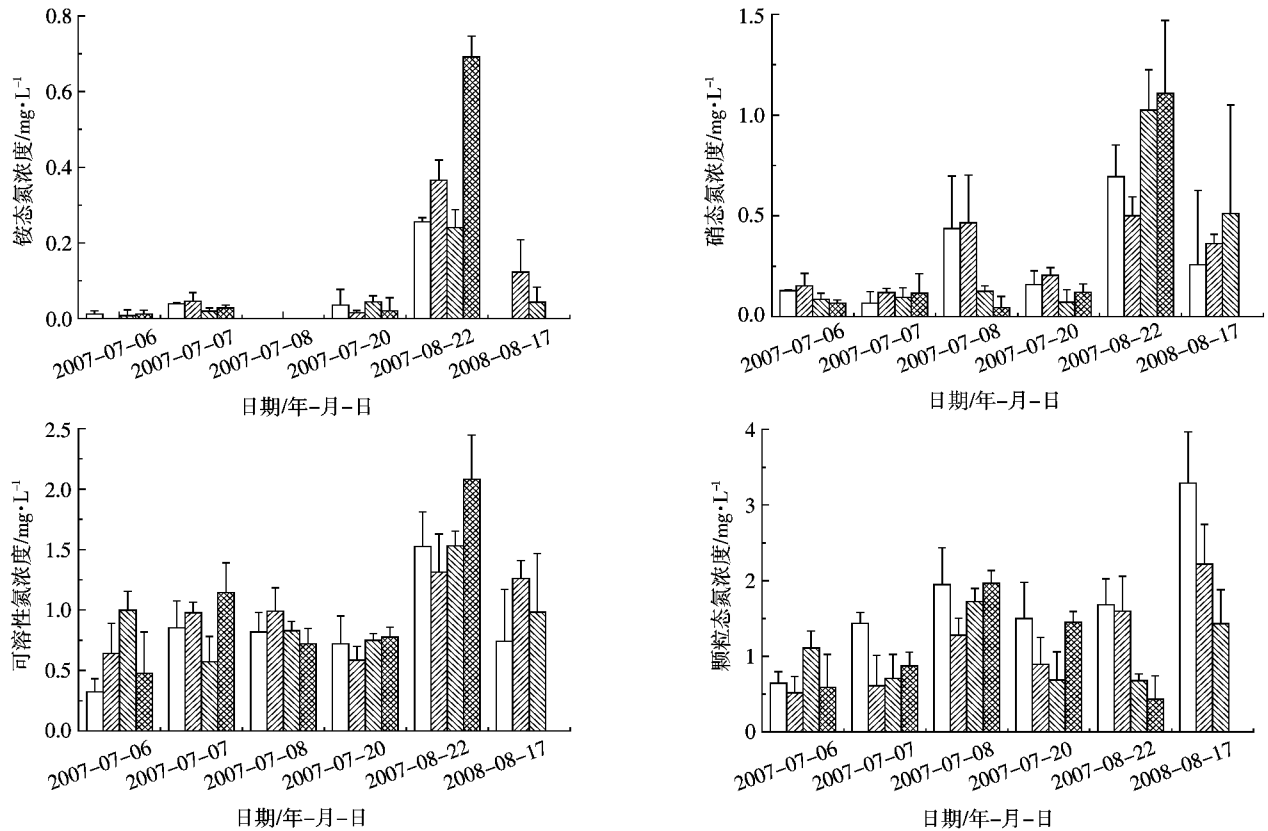


图3 各种试验处理下农田地表径流不同形态氮素浓度的时间变化过程及其分布差异

Figure 3 Concentrations of various nitrogen forms in runoff with time for 4 land uses

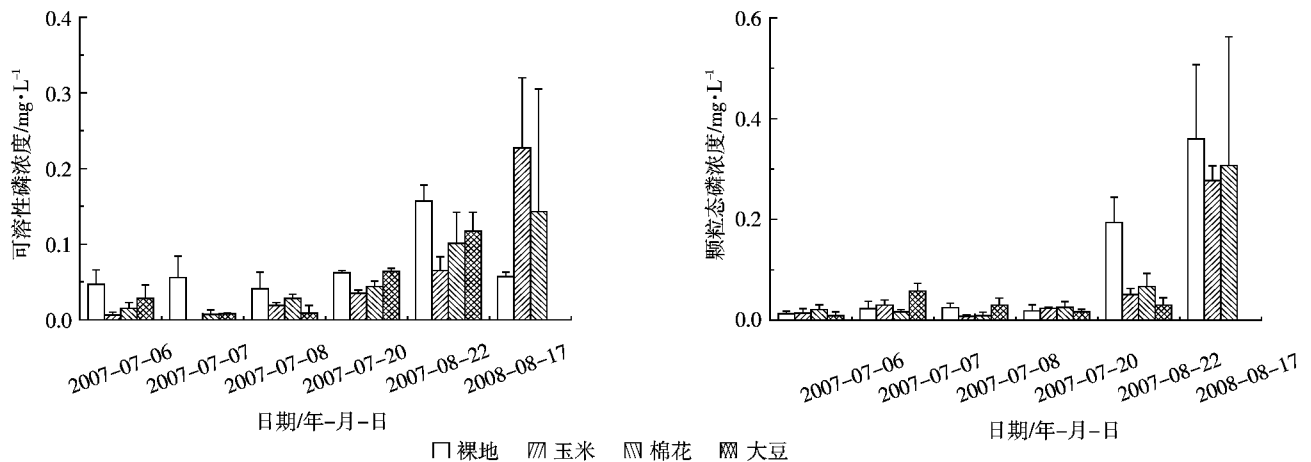


图4 各种试验处理下农田地表径流不同形态磷素浓度的时间变化过程及其分布差异

Figure 4 Concentrations of various phosphorus forms in runoff with time for 4 land uses

同形态氮磷流失量的时间变化过程及其分布差异。图5给出的结果表明,不同土地利用方式下农田地表径流铵态氮、硝态氮、可溶性氮流失量间的差异性在2007年7月总体上并不明显,而在8月份的差异却较为显著,裸地下不同形态的氮素流失量明显高于其他3种作物种植模式下的相应值,而大豆作物下的氮

素流失量最小。与2007年8月同期相比,2008年不同试验处理下的氮素流失量差异明显减少,其中裸地下的氮素流失量最高,而大豆下的氮素流失量仍为最低。从图6可见,2007年裸地下的农田地表径流可溶性磷流失量一直高于其他作物处理,且在8月份的差异达到最大,而不同作物处理间在可溶性磷流失量上

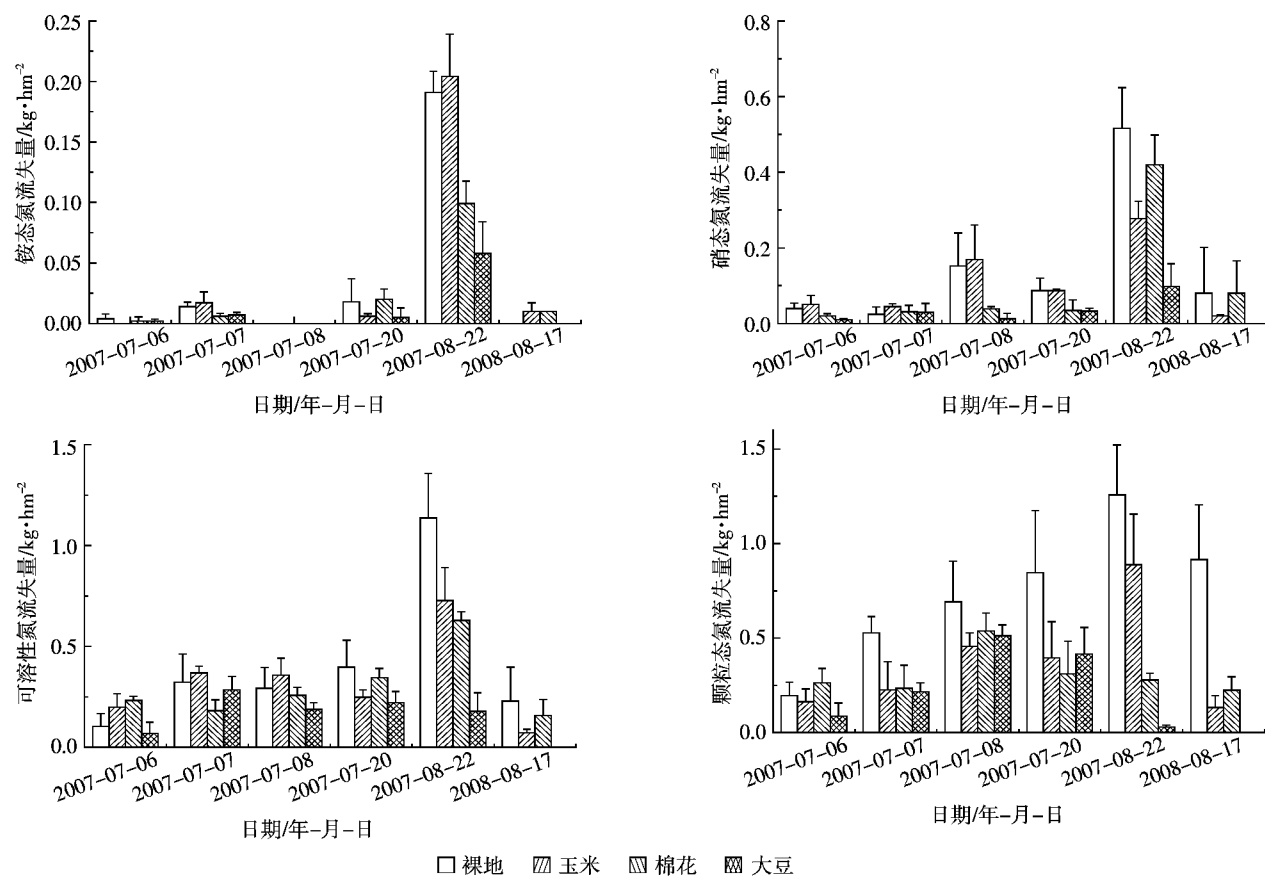


图5 各种试验处理下农田地表径流不同形态氮素流失量的时间变化过程及其分布差异

Figure 5 Loads of various nitrogen forms in runoff with time for 4 land uses

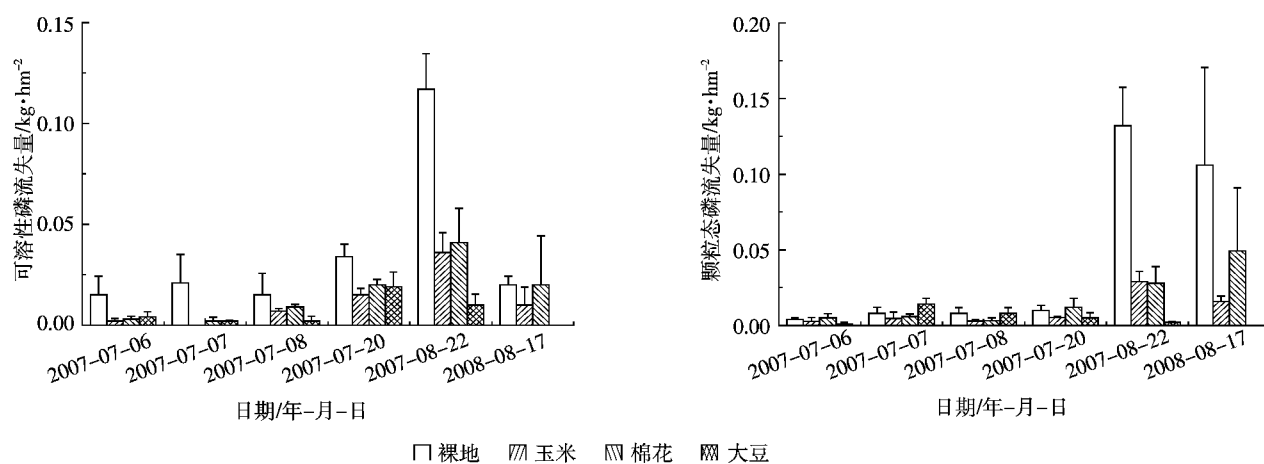


图6 各种试验处理下农田地表径流不同形态磷素流失量的时间变化过程及其分布差异

Figure 6 Loads of various phosphorus forms in runoff with time for 4 land uses

的差异在2007年7月份较小,但在8月份大豆作物下的可溶性磷流失量却明显低于其余作物处理,同比之下,2008年8月不同试验处理下的可溶性磷流失量差异明显减少。此外,不同土地利用方式下的农田地表径流颗粒态磷流失量间的差异在2007年7月份期间并不明显,但8月观测的差异性却较为显著。与

2007年8月同期相比,2008年不同试验处理在土壤颗粒态磷流失量上的差异有所减少,但裸地下的流失量最高,大豆作物下为最小。

3 结论

对2007—2008年汛期观测的田间试验数据进行

分析表明,农田地表径流深度受降雨量、雨强、地表植被覆盖程度等因素的影响显著,农田地表径流氮磷浓度构成分别以颗粒态氮和可溶性磷为主,而可溶性氮中又以溶解性有机氮为主,且硝态氮是农田地表径流无机氮流失的主要成分。农田地表径流氮磷浓度和流失量时间变化过程及其分布差异表现为,汛初7月的铵态氮、硝态氮、可溶性氮磷和颗粒态氮磷的浓度和流失量相对较小,不同土地利用方式下的差异性并不明显,但进入雨热同期的8月份,农田地表径流不同形态氮磷浓度及其流失量的差异明显增加,其中低秆高密度作物下的流失量最低。在淮北平原夏季种植大豆、棉花等冠层覆盖程度较高的矮秆作物,可有效减少农田地表径流氮磷流失量,减缓因农业非点源污染对地表水体富营养化产生的潜在威胁。

参考文献:

- [1] Forster D L, Rausch J N. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution programs in two Lake Erie tributaries[J]. *J Environ Qual*, 2002, 31(1):24-31.
- [2] 唐 莲, 白 丹. 农业活动非点源污染与水环境恶化[J]. 环境保护, 2003, 3:18-20.
TANG Liang, BAI Dan. Effect of agricultural non-point source pollution on water environment[J]. *Environmental Protection*, 2003, 3:18-20.
- [3] Miller G T. Living in the environment: an introduction to environmental science[R]. Belmont Wadsworth Publishing Company, 1992.
- [4] Keinman A P J, Srinivasan S M, Sharpely N A, et al. Phosphorus leaching through intact soils columns before and after poultry manure application[J]. *Soil Sci*, 2005, 70(2):153-166.
- [5] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3):55-58.
ZHANG Ya-li, ZHANG Xing-chang, SHAO Ming-an, et al. Impact of rainfall intensity on soil mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. *Transaction of the CSAE*, 2004, 20(3):55-58.
- [6] Djidjic L F, Bergstrom U B, Shirmohammadi A. Mode of transport of surface-applied phosphorus-33 through a clay and sandy soil[J]. *J Environ Qual*, 1999, 28(10):1273-1282.
- [7] Kleinman P J A, Sharpley A N, Veith T L et al. Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed soil boxes[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33(11):1413-1423.
- [8] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 农田径流氮磷污染负荷的田间施肥控制效应[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3):130-132.
DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, ZHANG Yu-juan. Effect of fertilizer application on controlling nitrogen and phosphorus pollution loading from farm land runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3):130-132.
- [9] Franklin D, Turman C, Potter T, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems[J]. *J Environ Qual*, 2007, 36(6):846-854.
- [10] 黄满湘, 章 申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, 58(1):147-154.
HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang, et al. Loss of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1):147-154.
- [11] Haygarth P M, Jarvis S C. Transfer of phosphorus from agricultural soils[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 66(3):195-249.
- [12] Osborne L L, Wiley M J. Empirical relationship between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed[J]. *J Environ Manage*, 1988, 26(1):9-27.
- [13] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准[S]. 北京, 2002.
State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water[S]. Beijing, 2002.
- [14] Zhang M K, Wang P L, He Z L. Spatial and temporal variation of nitrogen exported by runoff from sandy agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9):1086-1902.
- [15] He Z L, Zhang M K, Stoffella P J, et al. Phosphorus concentrations and loads in runoff water under crop production[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(6):1807-1816.
- [16] 黄 俊, 张 旭, 彭 炯, 等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2):255-258.
HUANG Jun, ZHANG Xu, PENG Jiong, et al. Temporal and spatial distribution and transportation of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):255-258.