

模拟降雨条件下北运河流域农田养分流失特征

刘 操¹, 马 宁¹, 龚明波^{2*}

(1.北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2.农业部农业微生物资源收集与保藏重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为了解北运河流域农田养分流失特征, 通过模拟降雨的情况下, 分析了降雨量对径流雨水中养分含量、土壤养分和泥沙流失的变化特征。结果表明, 北运河地区只有在暴雨情况下产生农田径流, 暴雨后, 农田径流雨水中总 N 浓度在 4.7~11.3 mg·L⁻¹, 氨态氮和硝态氮占 44.51%; 总 P 浓度在 0.66~1.35 mg·L⁻¹, 水溶磷含量占到总磷 54.08%。养分的流失以表层为主, 土壤表层总氮流失比例达到 29.79%, 氨态氮损失率达到 52.09%, 硝态氮损失 10.21%, 表层土壤总磷含量下降达到 16.48%, 水溶性磷损失 5.27%。农田径流泥沙中总氮含量为 0.66~1.27 mg·g⁻¹, 占总流失量的 82.28%; 总 P 浓度在 14.73~20 mg·g⁻¹, 占到总流失量的 99.89%; 模拟降雨后土壤大团聚体减少 8.8%, 而微团聚体增加 9.5%。

关键词: 模拟降雨; 农田养分; 流失; 北运河

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2016)03-0238-06

doi: 10.13254/j.jare.2015.0280

引用格式:

刘 操, 马 宁, 龚明波. 模拟降雨条件下北运河流域农田养分流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3):238-243.

LIU Cao, MA Ning, GONG Ming-bo. Characteristic of Soil Nutrients Loss in Beiyunhe Reservoir Under the Simulated Rainfall[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):238-243.

Characteristic of Soil Nutrients Loss in Beiyunhe Reservoir Under the Simulated Rainfall

LIU Cao¹, MA Ning¹, GONG Ming-bo^{2*}

(1.Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2.Key Laboratory of Microbial Resources, Ministry of Agriculture / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Field nutrient loss from soil became the major factor of the water pollution control in countryside in China. Beiyunhe reservoir is located in semiarid zone, where field nutrient loss distributed in summer. To assess the field nutrient loss in Beiyunhe reservoir, we conducted experiments to study the characteristic of soil nutrients loss by analysis of the content of runoff water, soil nutrients and runoff water sediment under simulated rainfall. The results showed that the runoff happened in the rainstorm. In runoff water, the content of TN was 4.7~11.3 mg·L⁻¹, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen accounted for 44.51% of TN; the content of P was 0.66~1.35 mg·L⁻¹, water soluble phosphorus accounted for 54.08% of TP. And the main loss of nutrients was in the surface soil, the loss of TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TP and DP were 29.79%, 52.09%, 10.21%, 16.48% and 5.27%, respectively. However, the most of field nutrient loss were in runoff sediment, the content of TN and TP were 0.66~1.27 mg·g⁻¹ and 14.73~20 mg·g⁻¹ in sediment, and TN and TP account for 82.28% and 99.89% of total loss of nutrient. After the rainstorm, the macro-aggregates were reduced 8.8%, and the micro-aggregates increased 9.5%.

Keywords: simulated rainfall; field nutrient; loss; Beiyunhe reservoir

农业面源污染已成为湖泊、河流水质的主要污染源之一,我国农田氮、磷使用量高,而氮肥和磷肥的利

用率只有约 30%和 20%^[1-4],大量未被利用的养分随着径流进入湖泊河流,造成湖泊河流总氮、总磷含量显著升高^[5-6]。土壤养分高盈余是导致农田养分流失的根本原因,粮食安全是我国重要任务,肥料高投入一直是保证农业生产增产的重要手段之一。肥料高投入导致的结果是利用率低,一部分肥料随雨水径流流失,一部分被土壤固定。肥料长期大量的投入,而且在

收稿日期:2015-11-27

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203001)

作者简介:刘 操(1977—),男,吉林浑江人,博士,主要从事水环境研究。E-mail:lc@bwsti.com

* 通信作者:龚明波 E-mail:gongcaas@163.com

不休茬的情况下,土壤中 N、P 含量越来越高,导致了农田耕层土壤营养元素处于高盈余状态^[7],在产生径流时,将加速氮、磷向水体迁移的速度。降雨产生径流是造成农田养分流失最主要的原因^[8-9]。在夏季雨量大时,农田径流雨水产生的快,径流中养分被土壤植物吸附时间短,较易进入沟渠、河流造成水体养分含量上升,尤其在河网发达地区,农田径流雨水更易进入沟渠、河流。总体上坡地比平地流失率高^[10-11],同时,养分流失与土壤结构、粘力等性质显著相关。北运河流域属于半干旱地区,雨水较少,而且比较集中,降雨虽然会产生径流,但是降雨量与径流之间的关系还不明确,降雨后养分流失特征还需要进一步的明确。本文针对北运河流域农田在降雨后,农田养分流失和变化规律不明确的问题,通过模拟降雨的情况下,分析了降雨量对径流雨水中养分含量、土壤养分和泥沙流失的影响,明确北运河流域在降雨后农田养分流失和土壤养分变化特征,为北运河流域农田养分流失有效控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

北京北运河地区农田种植土壤主要以潮土(顺义)和褐土(密云和怀柔)为主。潮土地势低平开阔,受黄土性母质影响,矿物养分较丰富,但有机质、氮素及速效磷较低。褐土母质为各类岩石风化物的残坡积物、黄土性母质、洪积物及洪积冲积物等,没有明显的钙积层。褐土以淀积粘化为主,兼有残积粘化,有机质累积强度不大,弱于山地棕壤,表层多为 2.5%~6.0%。褐土呈中性微碱性,阳离子交换量不高,不含交换性氢,无游离酸。

试验于 2014 年 5 月—2014 年 9 月在北京市顺义区(北京市顺义区北石槽镇,经度 40°13'15.24",纬度 116°36'54.54")大田进行。试验区海拔 37 m,年平均气温 11.5℃,年平均降雨量 625 mm,土壤为砂质潮土,机械组成主要为砂粒、粉粒、粘粒,分别占 78%、18%和 11%。0~20 cm 土壤样品基础值:有机质(OM) 12.62 g·kg⁻¹,全氮(N)1.07 g·kg⁻¹,氨态氮 0.20 mg·kg⁻¹,硝态氮 0.40 mg·kg⁻¹,总磷 34.40 mg·kg⁻¹,可溶磷 9.48 mg·kg⁻¹,pH 8.25。

1.2 试验设计

实验采取无作物农田模拟降雨,降雨按照暴雨的标准,2 h 降雨量为 55.75 mm,每个小区 1 m²,设置 3 个重复,试验小区的面积、形状、规格完全相同。径流

收集采用美国威斯康辛州的田间径流桶收集方法,用隔板隔断,隔板一端的外侧高度相对其他三端较高,该端的外侧高度相对内测也较高,在该端的边角处安放水管,用来引流,在小区外,挖孔埋放径流收集桶,用来收集径流水和泥沙。

1.3 取样

在第 15、30、45、60、75、90、105 min 和 120 min,记录降雨量,收集径流雨水和取表层土壤。径流雨水测定总氮、硝态氮、氨态氮、总磷、可溶磷和径流雨水中泥沙含量;土壤测定总氮、硝态氮、氨态氮、总磷和可溶磷的含量,泥沙中测定总氮和总磷含量。

1.4 数据测定和分析

水样中总氮:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012);硝态氮:紫外分光光度法;氨态氮:纳氏试剂比色法;总磷:流动注射-钼酸铵分光光度法(HJ 671—2013);可溶磷:钼锑抗比色法。土壤和泥沙中总氮:凯氏消煮法;硝态氮:紫外分光光度法;氨态氮:纳氏比色法测定;总磷:碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011);可溶磷:钼锑抗比色法。土壤团聚体依据湿筛法方法测定^[12],数据使用 Excel 2007 和 SPSS 21.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同降雨量下的雨水径流

北运河(北京)地区降雨主要集中在每年的 7 月和 8 月,为明确不同降雨类型条件下,雨水流失情况,通过自然降雨和人工模拟降雨,开展不同降雨情况下径流量的分析(表 1)。在 2014 年 5—7 月,实际测量了小到中雨、大到暴雨以及暴雨情况下雨水径流,在小到中雨和大到暴雨的情况下,没有径流产生,在 4 h 降雨 28 mm 的暴雨情况下,产生 2.12 L·m⁻²的径流;在 4 h 降雨 92 mm 的大暴雨情况下,产生 32 L·m⁻²的径流;在模拟大暴雨的情况下,2 h 降雨 55.75 mm,产

表 1 不同降雨类型下雨水径流的情况
Table 1 The results of runoff water in different rainfalls

降雨类型	降雨量/ mm	降雨时长/ h	径流量/ L·m ⁻²	时间	备注
小到中雨	16	24	0	2014 年 5 月	自然
小到中雨	10.6	12	0	2014 年 5 月	自然
大到暴雨	38.4	12	少量	2014 年 5 月	自然
暴雨	28	4	2.12	2014 年 7 月	自然
大暴雨	92	4	32	2014 年 9 月	自然
大暴雨	55.75	2	15		人工模拟

生 $15 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ 的径流。

通过模拟降雨 ($25 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 分析降雨量与雨水流失量之间的关系。由表 2 可以看出, 在 9 min 时, 开始产生径流, 雨水流失率随着降雨量的持续, 比例逐渐增加, 在 120 min 内, 降雨 55.75 mm, 每平方米产生 15.0 L 径流总量, 占降雨总量的 26.91%。

表 2 模拟降雨(暴雨)条件下,不同时间和降雨量下农田径流量
Table 2 The runoff of filed at different time and rainfalls in simulated rainfall

降雨时间/ min	降雨量/ mm	径流量/ $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$	径流总量/ $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$	雨水 流失率/%
9	6.2	产流		
15	8.6	0.54	0.54	6.28
30	16.55	1.53	2.07	12.53
45	22.7	1.73	3.81	16.78
60	30.6	1.77	5.58	18.23
75	33.85	1.90	7.48	22.10
90	38.6	1.79	9.27	24.02
105	47.7	3.37	12.64	26.51
120	55.75	2.36	15.00	26.91

2.2 模拟降雨条件下径流雨水中养分形态变化

2.2.1 雨水径流中不同形态氮

通过模拟降雨 ($25 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 分析雨水径流中总氮、氨态氮、硝态氮和其他形态氮的含量变化。由图 1 可以看出, 径流雨水中总氮浓度先升高后降低, 在 30 min 降雨量为 16.55 mm 时, 总氮浓度达到最高为 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 60 min 降雨量达到 30.6 mm 时降到最低, 之后浓度范围为 $4.7 \sim 11.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。氨态氮的浓度相对较低, 浓度范围 $0.2 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同样在模拟降雨

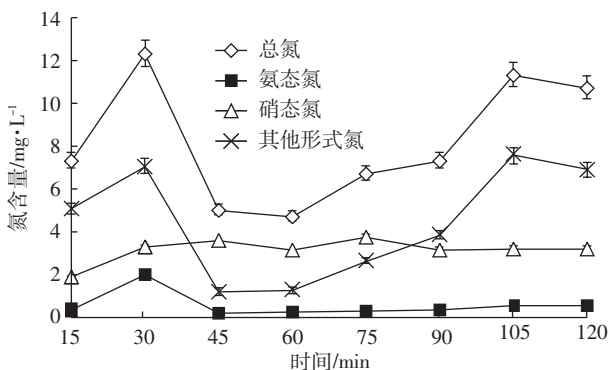


图 1 不同时间径流雨水中不同形态氮的含量

Figure 1 The content of different forms of nitrogen at different time in runoff water

初期雨水浓度达到 (30 min) 最高, 由于氨态氮较易挥发, 在土壤中浓度相对低, 雨水径流出氨态氮浓度也较低, 30 min 后, 氨态氮浓度为 $0.2 \sim 0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。硝态氮的浓度与总氮浓度规律不一致, 其浓度随着降雨时间延长升高后, 浓度区域平稳, 在 $3.15 \sim 3.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。其他形态浓度与总氮浓度变化一致。

雨水径流中不同形态氮总流失量如表 3 所示。在 120 min, 降雨量为 55.75 mm 时, 总共产生 $15 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ 的径流量, 总氮量为 $128.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中氨态氮、硝态氮和其他形态氮分别为 8.39 、 $48.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $71.54 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占总氮量的 6.51%、38.00% 和 55.49%。

表 3 径流雨水中流失不同形态氮总量

Table 3 The total of different forms of nitrogen in runoff water

降雨时 间/min	降雨量 /mm	径流量/ $\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$	流失总量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$			
			总氮	总氨态氮	总硝态氮	其他形态氮
15	8.6	0.54	3.94	0.19	1.03	2.74
30	16.55	1.53	18.82	3.06	5.05	10.76
45	22.7	1.73	8.65	0.35	6.23	2.08
60	30.6	1.77	8.32	0.44	5.58	2.24
75	33.85	1.9	12.73	0.57	7.13	4.97
90	38.6	1.79	13.07	0.63	5.64	6.86
105	47.7	3.37	38.08	1.85	10.78	25.55
120	55.75	2.36	25.25	1.3	7.55	16.32
水样总氮总流失量			128.9	8.39	48.98	71.54
占总氮比例				6.51%	38.00%	55.49%

2.2.2 模拟降雨条件下径流雨水中不同形态磷浓度的变化

图 2 为雨水径流中总磷、可溶磷和其他形态磷的含量变化图。从图 2 可以看出, 总磷的浓度在 $0.66 \sim$

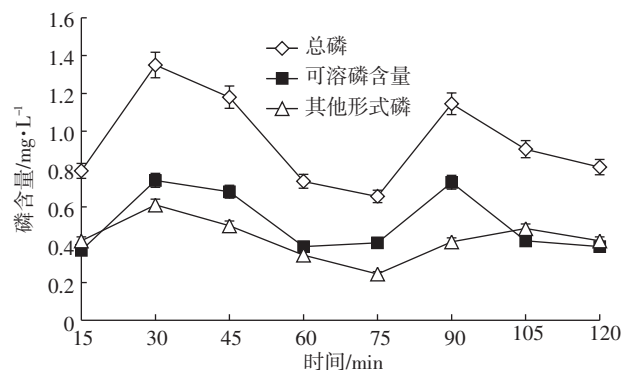


图 2 不同时间径流雨水中不同形态磷的含量

Figure 2 The content of different forms of phosphate at different time in runoff water

1.35 mg·L⁻¹ 之间,浓度变化与总氮总体一致,浓度先升高后降低,再升高降低,呈波浪型,在降雨初期浓度相对高。可溶磷和其他形态磷浓度与总磷的含量一致,可溶磷的浓度范围在 0.37~0.74 mg·L⁻¹ 之间变化,其他形态磷的含量在 0.25~0.61 mg·L⁻¹ 之间变化。

雨水径流中不同形态磷总流失量如表 4 所示。在 120 min,降雨量为 55.75 mm 时,总共产生 15 L·m⁻² 的径流量,流失总磷量为 14.09 mg·m⁻²,其中可溶磷和其他形态磷的含量分别为 7.62 mg·m⁻² 和 6.47 mg·m⁻²,分别占总磷的比例为 54.08%和 45.92%。

表 4 雨水径流中流失不同形态磷总量					
Table 4 The total of different forms of phosphate in runoff water					
降雨时间/ min	降雨量/ mm	径流量/ L·m ⁻²	流失总量/mg·m ⁻²		
			总磷	可溶磷	其他形态磷
15	8.6	0.54	0.43	0.20	0.23
30	16.55	1.53	2.07	1.13	0.93
45	22.7	1.73	2.04	1.18	0.87
60	30.6	1.77	1.30	0.69	0.61
75	33.85	1.9	1.24	0.78	0.47
90	38.6	1.79	2.05	1.31	0.74
105	47.7	3.37	3.05	1.42	1.63
120	55.75	2.36	1.91	0.92	0.99
流失总量			14.09	7.62	6.47
占总磷比例				54.08%	45.92%

2.3 模拟降雨条件下,径流泥沙产生与养分流失规律

在模拟降雨过程中,随着雨水的径流伴随着大量表层泥沙的流失,泥沙中含有大量的氮、磷。图 3 为在模拟降雨过程中泥沙流失中所含总氮的浓度,泥沙径流中总氮总体为逐渐降低的趋势,浓度范围在 0.66~1.27 mg·g⁻¹ 之间。图 4 为在模拟降雨过程中泥沙流失中所含总磷的浓度,泥沙径流中总磷在 90 min 之前比较平稳,之后浓度迅速下降。从 20 mg·g⁻¹ 下降到

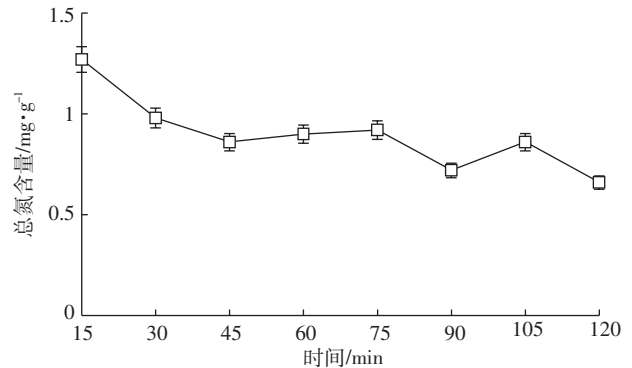


图 3 不同时间泥沙流失中总氮含量
Figure 3 The content of TN at different time in runoff sediment

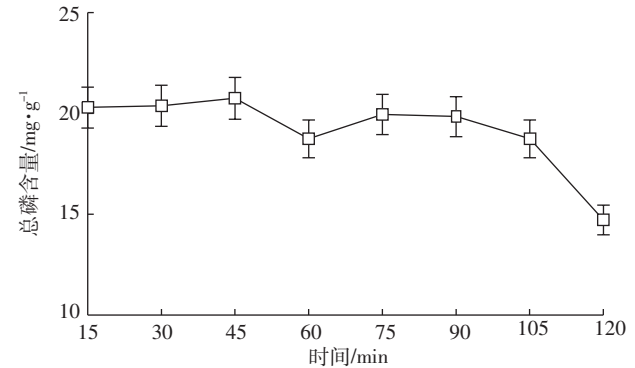


图 4 不同时间泥沙流失总磷的含量
Figure 4 The content of TP at different time in runoff sediment

14.73 mg·g⁻¹。从表 5 可以看出,随着降雨的时间延长,不同时间段的泥沙流失量逐渐增加,在 105~120 min 的 15 min 内,泥沙的流失量达到 168.81 g·m⁻²,因此,在不同时间段的总氮和总磷的流失量也逐步增加,在 120 min,降雨量为 55.75 mm 时,泥沙中总氮和总磷的量分别达到 598.72 mg·m⁻² 和 13 295.32 mg·m⁻²。

表 5 径流泥沙中总氮和总磷的总流失量				
Table 5 The total loss amount of TN and TP in runoff sediment				
降雨时间/ min	降雨量/ mm	泥沙总重/ g·m ⁻²	径流泥沙总氮/ mg·m ⁻²	径流泥沙总磷/ mg·m ⁻²
15	8.60	18.46	23.45	374.38
30	16.55	48.92	47.94	996.40
45	22.70	63.81	54.88	1 323.47
60	30.60	93.15	83.83	1 744.68
75	33.85	90.66	83.41	1 807.80
90	38.60	83.05	59.80	1 646.92
105	47.70	155.82	134.00	2 918.49
120	55.75	168.81	111.41	2 483.18
总量		722.68	598.72	13 295.32

2.4 雨水和泥沙径流中所携带养分分析

表 6 为模拟降雨在 120 min,降雨量为 55.75 mm 时,雨水和泥沙养分流失的总量。从表 6 可以看出,径流总氮量为 727.62 mg·m⁻²,其中雨水和泥沙分别占总量的 17.72%和 82.28%。径流总磷量达到 13 309.4 mg·m⁻²,主要以泥沙中所携带为主,占到 99.89%。虽然雨水径流中携带比例较小,但相对河流水体浓度较高,总氮和总磷浓度最高分别为 12.3 mg·L⁻¹ 和 1.35 mg·L⁻¹。

2.5 模拟降雨条件下,土壤结构和养分形态变化

土壤团聚体大小反映土壤的团粒结构主要影响

表 6 雨水和泥沙径流中养分总量
Table 6 The total nutrient in runoff water and sediment

径流	总氮/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%	总磷/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	占比/%
雨水	128.90	17.72	14.09	0.11
泥沙	598.72	82.28	13 295.31	99.89
总量	727.62		13 309.40	

空隙度,从而影响土壤含水率等土壤特性。在模拟降雨前,土壤中大团聚体占到土壤团聚体的 26.4%(表 7),微团聚体的含量为 73.6%,而降雨后,土壤大团聚体的含量显著减少,为 17.8%,比降雨前降低 8.8%,而微团聚体中<0.05 mm 的没有显著性变化,0.25~0.05 mm 之间的团聚体含量显著增加,为 57.8%,比降雨前高 9.5%。

降雨过后,土壤营养流失主要以表层土壤为主,对表层土壤氮、磷营养进行了分析,见表 8。由表 8 可以看出,总氮流失了 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,流失比例达到 29.79%;土壤中氨态氮流失率相对较高,由于氨态氮可溶性较强,氨态氮损失率最高,达到 52.09%;其次是其他形态氮,为 37.01%。表 9 可以看出,表层土壤

表 7 模拟降雨前后土壤团聚体的变化

Table 7 Changes of aggregates before and after simulated rainfall

团聚体粒径/ mm	大团聚体			微团聚体		
	>2	2~0.25	总和	0.25~0.05	<0.05	总和
降雨前/%	5.2	21.2	26.4	48.3	25.3	73.6
降雨后/%	1.3	16.5	17.8	57.8	24.6	82.2

表 8 降雨过后土壤中氮含量变化

Table 8 Change of N in soil after rainfall

流失状况	土壤不同形态氮			
	总氮	氨态氮	硝态氮	其他形式氮
降雨前/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	1.07	0.20	0.40	0.47
降雨后/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.75	0.10	0.36	0.29
流失量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.32	0.11	0.04	0.17
流失比率/%	29.79	52.09	10.21	37.01

表 9 降雨过后土壤中磷含量变化

Table 9 Change of P in soil after rainfall

流失状况	土壤不同形态磷		
	总磷	可溶磷含量	其他形态磷
降雨前/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	34.40	9.48	24.92
降雨后/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	28.73	8.98	19.75
流失量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	5.67	0.50	5.17
流失比率/%	16.48	5.27	20.75

总磷含量下降达到 16.48%,主要以不可溶磷损失为主。

3 讨论

农田养分流失已经成为河流、湖泊的重要污染源,农田养分进入河流、湖泊主要途径通过雨水径流,而雨水径流量主要影响因素包括雨量大小^[8]、土壤结构以及地形地势^[13],而径流雨水中养分含量的高低与土壤养分盈余、土壤性质与耕作方式等有关。北京地区属于半干旱地区,降雨比较集中,在小雨、中雨的情况下,在试验地没有径流量产生,只有在降雨比较急的情况下,实验地才产生径流而且径流量较大,在模拟情况下,2 h 降雨 55.75 mm 情况下,降雨 9 min 后就能产生径流,每平方米产生 15.0 L 径流总量,占降雨总量的 26.91%。北运河流域农田产生径流主要集中在夏季的暴雨季节,时间相对较短,对暴雨产生的径流控制就能减少径流带走的养分。刘琼琼等^[8]通过建立模型对径流进行分析,对北运河流域下游农田径流进行分析,降雨径流是农田养分径流的主要驱动因素,在雨季吸附态 N、P 输出负荷分别为 $40.98 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.42 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,溶解态 N、P 输出负荷分别为 $628.77 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $4.57 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,溶解态输出负荷更高。本实验中可溶态氮、磷的流失具有相似结果,暴雨后,农田径流雨水中氨态氮和硝态氮占 44.51%,水溶磷含量占到总磷 54.08%,养分的流失以表层为主,土壤表层总氮流失比例达到 29.79%,氨态氮损失率达到 52.09%,硝态氮损失 10.21%,表层土壤总磷含量下降达到 16.48%,水溶性磷损失 5.27%,减少表层养分的流失就能有效减少农田养分流失。

泥沙的流失是土壤氮、磷流失的重要因素,降雨条件下,土壤受雨滴冲刷致使土壤表层结构变化,泥沙伴随雨水流失,较大的净流量会产生较大的泥沙流失,从而导致土壤部分氮素随流失泥沙损失^[10],磷在土壤中较强的固定性,而且,磷主要以不溶形态存于土壤中,磷的迁移能力较弱,因此磷的流失主要途径通过泥沙流失^[13]。在北运河流域,农田的养分流失主要伴随着泥沙的流失,泥沙中携带大量的养分,在本实验中,农田径流泥沙中总氮流失量达到总流失量的 82.28%,磷达到总流失量的 99.89%,同时土壤的机械组成也是泥沙流失的重要影响因素,沙粒含量高的土壤容易产生泥沙流失,充分考虑北运河地区泥沙流失特点加以控制才能防止暴雨后农田养分的流失。

4 结论

北运河地区只有在暴雨情况下产生农田径流。暴雨后,农田径流雨水中氨态氮和硝态氮占 44.51%,水溶磷含量占到总磷 54.08%。养分的流失以表层为主,土壤表层总氮流失比例达到 29.79%,氨态氮损失率达到 52.09%,硝态氮损失 10.21%;表层土壤总磷含量下降达到 16.48%,水溶性磷损失 5.27%。农田径流泥沙中总氮占总流失量的 82.28%,总磷占到总流失量的 99.89%。模拟降雨后土壤大团聚体减少 8.8%,而微团聚体增加 9.5%。

参考文献:

- [1] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6):658-665.
LI Ting-liang, XIE Ying-he, HONG JIAN-ping, et al. Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in drylands of South Shanxi Province [J]. *Chin J Eco-Agri*, 2013, 21(6):658-665. (in Chinese)
- [2] 章明清, 李 娟, 孔庆波, 等. 不同磷肥用量对菜稻轮作土壤磷肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4):952-955.
ZHANG Ming-qing, LI Juan, KONG Qing-bo, et al. Effect of different P fertilizer application rates on P use efficiency in vegetable-paddy rice rotation system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):952-955. (in Chinese)
- [3] 袁 亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3):620-628.
YUAN Liang, ZHAO Bing-qiang, LIN Zhi-an, et al. Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles [J]. *J Plant Nutri Ferti*, 2014, 20(3):620-628. (in Chinese)
- [4] 李 敏, 叶舒娅, 刘 枫, 等. 稳定氮肥用量对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4):323-327.
LI Min, YE Shu-ya, LIU Feng, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *J Agricul Resour Environ*, 2014, 31(4):323-327. (in Chinese)
- [5] 熊汉锋, 万细华. 农业面源氮磷污染对湖泊水体富营养化的影响[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):25-27.
XIONG Han-feng, WAN Xi-hua. Investigation of nitrogen and phosphorus loadings on Liangzi Lake from agricultural non-point source[J]. *Environ Sci Techn*, 2008, 31(2):25-27. (in Chinese)
- [6] 谭 霞, 王 康, 黄介生. 农业面源污染入河量特征污染物反演法研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33:224-227.
TAN Xia, WANG Kang, HUANG Jie-sheng. Estimation of export load of agricultural nonpoint source pollutions using inversion analysis[J]. *J Irrig Drain*, 2014, 33:224-227. (in Chinese)
- [7] 左海军, 张 奇, 马履一, 等. 不同种植方式下农田渗漏水硝态氮含量的动态变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2010(5):174-179.
ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, MA Lv-yi, et al. Dynamic variation characteristics of nitrate nitrogen concentration in farmland leaching water under different planting patterns[J]. *J Soil Water Conserv*, 2010(5):174-179. (in Chinese)
- [8] 刘琼琼, 邵晓龙, 刘红磊, 等. 北运河下游流域典型设施农田非点源污染负荷量化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2015(4):500-505.
LIU Qiong-qiong, SHAO Xiao-long, LIU Hong-lei, et al. Quantification of agricultural non-point source pollution load from facility farmlands typical of the down-stream watershed of the north canal[J]. *J Ecology Rural Environ*, 2015(4):500-505. (in Chinese)
- [9] 王心星, 荣湘民, 张玉平, 等. 玉米与不同作物间套作条件下旱地径流的磷损失特征[J]. 水土保持学报, 2015(4):97-103.
WANG Xin-xing, RONG Xiang-min, ZHANG Yu-ping, et al. Characteristic of phosphorus loss in dry land runoff under different intercropping modes of maize and different crops[J]. *J Soil Water Conserv*, 2015(4):97-103. (in Chinese)
- [10] 郭新送, 宋付朋, 高 杨, 等. 模拟降雨下 2 种尿素的坡地氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):26-30.
GUO Xin-song, SONG Fu-peng, GAO Yang, et al. Nitrogen losses characteristics of two kinds of ureas under the simulated rainfall[J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28(5):26-30. (in Chinese)
- [11] 李 玫, 王莉玮, 何为媛, 等. 重庆市农田氮磷流失系数初探[J]. 农业环境与发展, 2013, 30(4):83-86.
LI Mei, WANG Li-wei, HE Wei-yuan, et al. An exploration of farmland nitrogen and phosphorus loss coefficient in Chongqing City, China [J]. *Agro-Environment & Development*, 2013, 30(4):83-86. (in Chinese)
- [12] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Sci Society Ameri J*, 1986, 50(3):627-633.
- [13] 郭新送, 宋付朋, 高 杨, 等. 模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):23-30.
GUO Xin-song, SONG Fu-peng, GAO Yang, et al. Characteristics of lost sediment and its nutrient enriched effect on three types soil slope under simulated rainfall[J]. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28(3):23-30. (in Chinese)