

乡村散养家禽场地径流污染物出流规律研究

张忠祥^{1,2}, 费一鸣³, 傅大放^{1,4}

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 中电建水环境治理技术有限公司, 广东 深圳 518102; 3. 昆山城市建设投资发展集团有限公司, 江苏 昆山 215300; 4. 东南大学-蒙纳士大学海绵城市联合研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 乡村散养家禽场地径流污染是农业面源污染的重要组成部分,因其分散不易控制,对水环境的影响日益凸显,而摸清该类径流的污染特征是开展相关治理工作的重要基础。为此研究了散养家禽场地径流中主要污染物的出流规律,并初步分析了降雨特征的影响。结果表明,径流污染物事件平均浓度(EMC)较高,COD_{Mn}、TN、TP和NH₃-N的EMC均值分别为地表水V类标准限值的1.7、12.1、7.3和3.3倍,TSS的EMC均值为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)三级标准限值的11.5倍,TN和TP是主要污染物;径流污染物存在弱初期冲刷效应,初期冲刷比值FF₂₀为1.0~1.5;降雨总量和降雨强度对径流污染物特征的影响较显著,与污染物浓度呈显著负相关,与初期冲刷比值呈显著正相关;前期晴天数越长,则径流中TP浓度越高,其他污染物浓度和前期晴天数的相关性不明显。

关键词: 乡村散养家禽; 径流污染; 事件平均浓度; 初期冲刷效应

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0121-06

Characteristic of Runoff Pollutants from Rural Free-roaming Poultry Farm

ZHANG Zhong-xiang^{1,2}, FEI Yi-ming³, FU Da-fang^{1,4}

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. PowerChina Water Environment Governance Co. Ltd., Shenzhen 518102, China; 3. Kunshan City Construction Investment & Development Group Co. Ltd., Kunshan 215300, China; 4. SEU-Monash Joint Research Center <Nanjing> on Sponge Cities, Nanjing 210096, China)

Abstract: Runoff pollution from rural free-roaming poultry farm is an important part of agricultural non-point source pollution, because of its dispersion and hard to control, its impact on water environment has become increasingly prominent, and finding out the pollution characteristics of this runoff is an important foundation for carrying out related management work. Therefore, variation of the main pollutants in runoff from rural free-roaming poultry farm was investigated, and its influence by rainfall characteristics was preliminarily analyzed. Results showed that event mean concentration (EMC) of runoff pollutant was high: the mean values of COD_{Mn}, TN, TP and NH₃-N were 1.7, 12.1, 7.3 and 3.3 times as high as the limits of the surface water V class standard, the EMC of TSS was 11.5 times of the three-level standard limit of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), and TN and TP were the main pollutants. There existed weak first flush effect of runoff contami-

nants, and the first flush ratio FF_{20} was about 1.0 to 1.5. The effect of total rainfall and rainfall intensity on the characteristics of runoff pollutants was significant, which was negatively correlated with the pollutants concentration and significant positive correlated with the first flush ratio. The longer of sunny days, the higher TP concentration was in the runoff, while the correlation between other pollutant concentrations and the number of sunny days was not significant.

Key words: rural free-roaming poultry; runoff pollution; event mean concentration; first flush effect

农村散养家禽场地的降雨径流中含有大量污染物,如果任其直接排放到受纳水体中,会给整个乡村及其周围地区的水环境带来很大危害,不仅易造成湖泊河流富营养化,也会严重威胁群众的用水安全^[1~3],正确认识散养家禽场地径流的污染特征并寻求有效的治理方法是非常必要的^[4]。自20世纪70年代以来,国内外相继开展了径流污染的研究^[5~7],发现径流污染的产生具有较大的随机性和不确定性,存在晴天积累、雨天排放的特征;污染负荷的时空变化幅度大,不同地点、不同时间产生的污染程度相差甚远;影响因素众多,不同降雨特征会对污染物的浓度和形态产生较大影响。然而这些研究大都以路面或屋面径流为对象,很少涉及乡村散养家禽场地的径流污染,基础研究的匮乏制约了针对该类径流管控的科学性和有效性。

本研究自建散养鸡舍和径流收集装置,通过数场模拟降雨试验,研究了散养家禽场地径流的污染水平及污染物浓度变化特征,并分析影响径流水质的环境因素,探讨散养家禽场地径流中的污染物排放规律,以期该类污染的治理工作提供参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置位于南京市某厂区绿地内,由散养鸡舍、模拟降雨系统和径流收集槽三部分组成。散养鸡舍占地为 3.5 m^2 ,养鸡9只,养殖密度为 $2.6\text{ 只}/\text{m}^2$,所养家禽均为当地土鸡,喂食稻谷、玉米和白米,尽量还原乡村散养情况。模拟降雨系统由水箱、水泵、控制箱和喷洒支架组成,可模拟 $6\sim 120\text{ mm/h}$ 的连续降雨,降雨均匀度系数 >0.86 ,降雨高度为4 m,可使雨滴大小和落地能量与自然降雨相似。径流收集槽设置于散养鸡舍一侧,把径流汇集于径流槽一端的采样井。

1.2 样品采集与测试

采集散养鸡舍场地的降雨径流,采样频率取

“前密后疏”的方式:自径流产生起计时,30 min 内的径流每隔 $5\sim 10\text{ min}$ 取样一次;30 min 以后每隔 $10\sim 20\text{ min}$ 取样一次,直至降雨事件结束。采样的同时,由降雨系统自带雨量计同步记录降雨特征。

所采集的径流样品储存在500 mL 聚乙烯瓶内,及时送至专业检测机构进行水质分析,测定的污染物指标有: COD_{Mn} 、TN、 NH_3-N 、TP 和 TSS,测定方法采用国家标准方法。

2 结果与讨论

2.1 降雨特征分析

2016年5月—10月共监测14场降雨事件,包含11场人工模拟降雨和3场自然降雨,各降雨事件的特征见表1。

表1 监测降雨事件的特征

Tab. 1 Characteristics of monitoring rainfall

项 目	降雨 历时/ min	降雨 量/ mm	平均雨 强/(mm · min ⁻¹)	最大雨 强/(mm · min ⁻¹)	晴天 数/ d	重现 期/ 年
2016-05-04	147	36	0.245	0.8	8	0.5
2016-05-19	87	34	0.4	1.18	4	0.5
2016-06-16	70	48	0.686	1.385	6	1.5
2016-07-17	66	87	1.32	2.3	2	34
2016-07-21	108	77	0.713	1.4	3	6
2016-07-27	52	39	0.75	1.69	4	1.1
2016-08-03*	31	15	0.484	1.57	7	0.25
2016-08-11	74	38	0.514	1.17	5	0.5
2016-08-18	55	39	0.709	1.66	7	1
2016-08-28	70	45	0.643	1.335	10	1.26
2016-09-08	58	61	1.05	1.847	11	4.67
2016-10-06	90	48	0.54	1.15	5	1.27
2016-10-21*	73	35	0.479	1.01	13	0.63
2016-10-30*	113	29	0.257	0.98	9	0.35

注: “*”为自然降雨事件。

由表1可见,本研究所监测的14场降雨事件特征差异较大,包含了不同的降雨类型,对大、中强度的降雨具有较好代表性(小雨时场地极少产流),降

雨量变化范围为 15 ~ 87 mm, 平均降雨强度变化范围为 0.245 ~ 1.32 mm/min, 前期晴天数的变化范围为 2 ~ 13 d, 重现期变化为 0.25 ~ 34 年, 可较好地模拟鸡舍产流情况。

2.2 径流污染物出流浓度变化

图1为2016年7月17日和27日两场降雨事件中各污染物出流浓度随降雨历时的变化情况, 可以看出, 除 TSS 外, 各污染物浓度均经历了由高到低的变化过程。

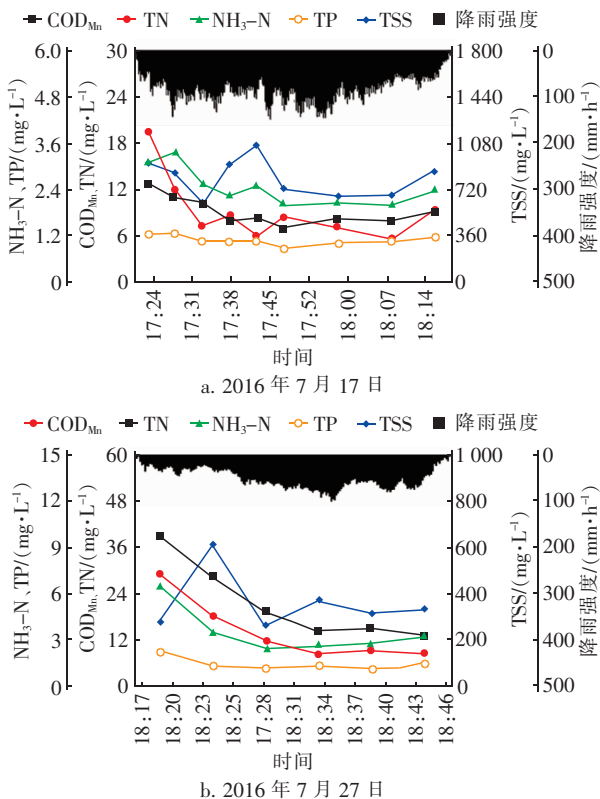


图1 散养鸡舍降雨径流中各污染物浓度的变化过程

Fig.1 Variation of pollutants concentration in runoff of chicken farm

在2016年7月17日的降雨事件中, 径流产生10 min内, COD_{Mn} 、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均达到最大值, 分别为12.7、19.6、1.3、3.4 mg/L, 随后逐渐下降, 30 min后趋于平稳, 浓度分别为7.9、6.7、1.0、2.1 mg/L, 径流初期浓度分别为后期的1.6、2.9、1.3、1.6倍。TSS浓度在径流产生后存在波动, 整体未出现明显的变化趋势。在降雨末期各污染物浓度小幅上升, 这是由于降雨末期降雨强度减少, 对污染物的稀释作用变弱所致。

在2016年7月27日的降雨事件中, COD_{Mn} 、TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在径流产生后便达到了最大,

分别为29.2、39.2、2.3、6.4 mg/L, 随后快速下降, 约25 min后稳定在较低水平, 分别为8.4、12.9、1.1、2.7 mg/L, 径流初期浓度分别为后期的3.5、3.0、2.1、2.4倍。TSS浓度在径流产生后先增大后减小, 最后维持在稳定水平, 整体变化不大。与7月17日的降雨事件相比, 7月27日的降雨强度较小, 且降雨量随降雨历时逐渐增大, 导致径流中污染物浓度更高, 径流初期与后期污染物浓度的差别更大。

2.3 径流污染物事件平均浓度

降雨特征、区域特征等影响因素的不确定性导致了同一地区在同一降雨事件中的径流污染物浓度变化很大, 为了对单场降雨事件的污染水平进行评估, 用场次降雨污染物平均浓度(EMC)来表征一场降雨地表径流全过程排放的某污染物平均浓度, 计算公式如下:

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t)dt}{\int Q(t)dt} \approx \frac{\sum C_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

其中, $C(t)$ 、 $Q(t)$ 分别为一次降雨事件产流期间的径流污染物浓度和径流量; C_i 、 Q_i 分别为第*i*段时间测得的污染物浓度和径流体积; M 为一次降雨事件特定污染物的总质量; V 为径流总体积。

与混合样平均浓度相比, 根据流量加权平均求得的 EMC 更能够准确反映径流污染程度, 并且可以方便地估算、评价不同场次降雨的径流污染负荷。实测的14场降雨事件中各污染物的 EMC 值见表2。

表2 散养鸡舍降雨径流中各污染物的 EMC 值

Tab.2 EMC of pollutants in runoff of chicken farm

mg · L⁻¹

项 目	COD_{Mn}	TN	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	TSS
2016-05-04	38.5	29.0	5.9	14.4	610.9
2016-05-19	34.4	30.8	1.8	11.0	733.2
2016-06-16	38.8	29.5	3.6	12.3	725.7
2016-07-17	8.6	8.3	1.1	2.3	791.5
2016-07-21	10.9	18.7	1.5	4.0	599.6
2016-07-27	10.1	16.0	1.3	2.9	342.8
2016-08-03	37.2	28.1	5.4	4.6	936.0
2016-08-11	28.4	33.4	2.4	3.5	620.3
2016-08-18	14.4	29.5	1.7	4.4	295.3
2016-08-28	33.2	25.8	2.7	6.0	540.5
2016-09-08	19.9	24.6	1.8	6.6	155.3
2016-10-06	25.4	17.9	1.3	3.1	362.1
2016-10-21	31.4	19.5	4.7	5.6	626.7
2016-10-30	35.5	27.7	5.5	9.7	685.0
平均值	26.2	24.2	2.9	6.5	573.2
地表水Ⅴ类标准限值	15.0	2.0	0.4	2.0	—

由表2可见,散养鸡舍降雨径流中 COD_{Mn} 、TN、TP、 NH_3-N 、TSS 的 EMC 均值分别为地表水 V 类标准限值的 1.7、12.1、7.3 和 3.3 倍, TSS 的 EMC 均值为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 三级标准限值的 11.5 倍。由此可知,乡村分散家禽养殖场降雨径流中的污染物浓度较高,其中总氮和总磷是主要污染因子。

从表2还可以看出,各污染物浓度变化范围较大,说明不同场次降雨径流的污染水平差别较大,受降雨特征等环境因素干扰较强,因此有必要对降雨特征等影响因素进行分析。

2.4 EMC 的影响因素

影响散养鸡舍径流水质的降雨特征包括降雨历时、降雨量、平均降雨强度、最大降雨强度、前期晴天数等若干因子。本研究为了探讨这些降雨特征对降雨径流污染物事件平均浓度的影响,对散养鸡舍 14 场降雨径流污染物 EMC 和各降雨特征之间的相关性进行了分析,如图2所示。

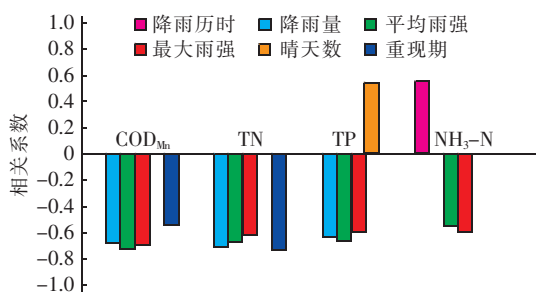


图2 径流污染物 EMC 与降雨特征的相关性

Fig. 2 Correlation parameter between contaminations and rainfall

由图2可见, COD_{Mn} 、TN、TP 的 EMC 值与降雨量、平均降雨强度和最大降雨强度均呈负相关, COD_{Mn} 、TN 的 EMC 值与降雨重现期呈显著负相关, NH_3-N 的 EMC 值与平均降雨强度和最大降雨强度呈负相关,这主要是由于雨水的稀释作用,导致一段时间内降雨量越多,污染物浓度就越低。 NH_3-N 的 EMC 值与降雨历时呈显著正相关,说明氨氮的冲刷是一个较为持续的过程,降雨后期仍有较高负荷氨氮进入径流。前期晴天数越长,径流中的 TP 浓度就越高,而其他污染物浓度和前期晴天数的相关性不明显,这与路面径流的研究结论普遍存在差异^[8,9],可能的原因是散养鸡舍与道路相比,地表粗糙性、粘性、渗透系数更大,单场降雨很难将累积污

染物冲刷殆尽,残余的污染物会对下一场降雨的污染物 EMC 值产生较大影响。

2.5 径流污染初期冲刷效应

雨水的初期冲刷效应是指在降雨冲刷地表产流的过程中,初期雨水对地表冲刷过后的径流污染物浓度较后期高很多的一种现象,通过对污染物初期冲刷效应的分析,可以为特定区域的径流污染管控提供依据。借助常用的场次降雨累积污染物总量与累积径流总量之比的曲线,即 $M(V)$ 曲线,可以判定是否存在初期冲刷效应。对 2016 年 5 月—10 月期间 11 场降雨事件中的每种污染物绘制 $M(V)$ 曲线进行分析,限于篇幅,将其中 2 场降雨事件中污染物的 $M(V)$ 曲线示于图3,其中黑色实线为平衡线。通过分析发现,这 11 场降雨中污染物的 $M(V)$ 曲线大部分位于平衡线之上,说明污染物浓度的增加速度要高于径流量的增长速度,存在初期冲刷效应。

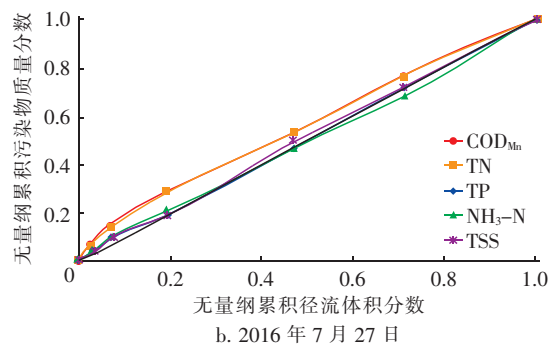
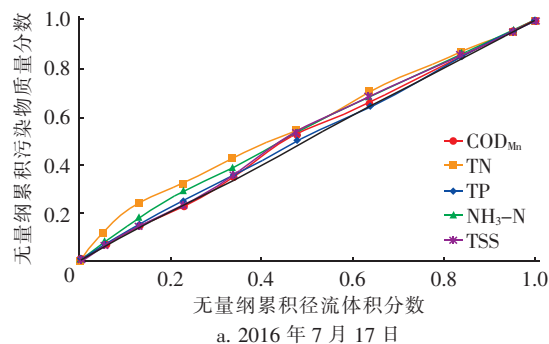


图3 降雨事件中各污染物的 $M(V)$ 曲线

Fig. 3 $M(V)$ curve of first flush effect in different rainfall events

为了定量考察散养鸡舍径流初期冲刷效应的程度,用初期冲刷比值 FF_{20} (即径流产生 20 min 内污染物的 EMC 和整场降雨径流中污染物的 EMC 的比值)来表示初期冲刷的强度, FF_{20} 值越大,则初期冲刷强度就越大。计算结果表明,11 场降雨径流中

主要污染物的 FF_{20} 值在 1.0 ~ 1.5 之间,可以认为这 11 场降雨均存在初期冲刷效应,但效应程度较弱。按照 FF_{20} 中位数的大小排序为: $TN > COD_{Mn} > TP > NH_3 - N > TSS$,其中 TSS 的 FF_{20} 值变化较大,个别降雨场次中 $FF_{20} < 1.0$,不存在初期冲刷效应。

本试验结果与许多初期冲刷效应研究结论迥异^[10,11],这可能是由汇水区域的不同性质造成的,与屋面、路面等硬化汇水区域相比,散养鸡舍地表粗糙,粘性和渗透系数更大,导致积累的污染物较难被冲刷,在汇流途中部分污染物还会被植物、沙石拦截,导致初期冲刷效应不显著,后期径流中污染物浓度仍较高。

2.6 初期冲刷效应的影响因素

为了研究降雨特征对径流污染物初始冲刷效应的影响,对上述 11 场降雨径流中污染物的 FF_{20} 值和各降雨特征间的相关性进行分析,将具有显著性的 Pearson 相关系数示于图 4。

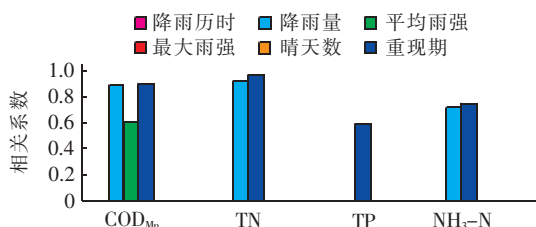


图4 径流污染物的 FF_{20} 值与降雨特征之间的相关性

Fig. 4 Correlation between FF_{20} and rainfall characteristics

由图 4 可见, COD_{Mn} 的 FF_{20} 值受降雨量、平均雨强和重现期影响较大,与它们呈显著正相关; TN 和 $NH_3 - N$ 的 FF_{20} 值与降雨量和重现期呈显著正相关; TP 的 FF_{20} 值与重现期呈显著正相关,这说明对于乡村分散家禽养殖场,在降雨量和降雨强度较大的情况下更容易发生污染物的初期冲刷效应。

3 结论

① 经过 14 场降雨,散养鸡舍产生的径流中 COD_{Mn} 、 TN 、 TP 和 $NH_3 - N$ 的 EMC 均值分别为 26.2、24.2、2.9、6.5 mg/L,为地表水 V 类标准限值的 1.7、12.1、7.3 和 3.3 倍; TSS 的 EMC 均值为 573.2 mg/L,为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)三级标准限值的 11.5 倍。降雨径流中污染物浓度较高,总氮和总磷是主要污染因子。

② 不同降雨场次下散养鸡舍径流的污染水平

相差较大,明显受降雨特征等环境因素干扰,其中降雨量、平均降雨强度和最大降雨强度对各污染物出流浓度影响较大,呈显著负相关;前期晴天数对径流中 TP 浓度影响较大,但对其他污染物的影响不显著。

③ 径流污染物普遍存在初期冲刷效应,显著程度为: $TN > COD_{Mn} > TP > NH_3 - N > TSS$,多场降雨事件中 TSS 未表现出初期冲刷效应,降雨量和降雨强度是影响乡村散养家禽场地径流污染物初始冲刷效应的主要因素,各污染物初期冲刷比值 FF_{20} 在 1.0 ~ 1.5 之间,初期冲刷程度较弱,在制定治理方案时不能忽视降雨后期径流。

参考文献:

- [1] 寇利卿. 畜禽养殖粪污水中 N、P 等含量的研究及对环境的影响分析[J]. 地下水, 2015, 37(1): 73 - 74.
Kou Liqing. Research for contents of N, P and others in livestock manure water and its environmental impacts analysis[J]. Ground Water, 2015, 37(1): 73 - 74 (in Chinese).
- [2] Mallin M A, Mciver M R, Robuck A R, et al. Industrial swine and poultry production causes chronic nutrient and fecal microbial stream pollution[J]. Water Air Soil Pollut, 2015. DOI: 10. 1007/s11270-015-2669-y.
- [3] Nayak B, Weidhaas J, Harwood V J. LA35 poultry fecal marker persistence is correlated with that of indicators and pathogens in environmental waters[J]. Appl Environ Microbiol, 2015, 81(14): 4616 - 4625.
- [4] 张萍. 农村畜禽养殖污染整治难点及建议[J]. 污染防治技术, 2013, 26(6): 45 - 47.
Zhang Ping. Problems and recommendations of livestock pollution remediation in rural [J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(6): 45 - 47 (in Chinese).
- [5] Li D Y, Wan J Q, Ma Y W, et al. Stormwater runoff pollutant loading distributions and their correlation with rainfall and catchment characteristics in a rapidly industrialized city[J]. Plos One, 2015. DOI: 10. 1371/journal. pone. 0118776.
- [6] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3522 - 3526.
Bian Bo. Effect of antecedent dry period on water quality of urban storm runoff pollution[J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3522 - 3526 (in Chinese).
- [7] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染 (下转第 135 页)