

张小磊, 孙颖雪, 张桐, 等. 南方某城市河流沿岸农田降雨径流面源污染输出特征[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 147-158.

ZHANG X L, SUN Y X, ZHANG T, et al. Characteristics of non-point source pollution-output of rainfall runoff from farmland alongshore rivers in a southern city [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 147-158.

## 南方某城市河流沿岸农田降雨径流面源污染输出特征

张小磊, 孙颖雪, 张桐, 李继, 王宏杰\*, 董文艺

(哈尔滨工业大学<深圳>生态环境学院, 广东深圳 518055)

**摘要** 【目的】南方某城市河流在多雨季节常存在氮、磷污染问题。根据调研发现,该河流的主要污染源来自周边道路及沿岸菜地田的降雨径流,为进一步确定农田降雨径流对该河流污染的贡献率,研究对该河流沿岸典型蔬菜农田降雨径流污染物的输出规律和特征进行监测与分析。【方法】研究选取南方某城市河流沿岸典型蔬菜农田一处操作性良好的区域为研究对象,从2022年6月—2022年8月进行降雨径流监测,包括水位和流速,同时布设采样点收集雨水径流,在现场对水样进行加酸调pH值至2以下,后续对水样的悬浮物(SS)、总磷(TP)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )、总氮(TN)、氨氮等指标进行检测并分析。【结果】TP是农田降雨径流的主要污染物,平均质量浓度和最高质量浓度分别为6.91 mg/L和13.32 mg/L,且以溶解态无机磷为主要输出形式(平均占比为74%)。在降雨冲刷农田时,各污染物初期冲刷强度排序为:氨氮>TP>SS>TN>溶解态有机物(DOM),且在持续性的降雨冲刷农田时更易出现初期冲刷效应。【结论】通过对该区域的研究发现,降雨径流中溶解态的无机氮和无机磷是径流中氮、磷的主要形式,且控制该区域农业面源污染的主要任务是降低磷排放。

**关键词** 农田面源污染 降雨径流 初期冲刷 河流污染 磷排放

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0147-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.018

## Characteristics of Non-Point Source Pollution-Output of Rainfall Runoff from Farmland Alongshore Rivers in a Southern City

ZHANG Xiaolei, SUN Yingxue, ZHANG Tong, LI Ji, WANG Hongjie\*, DONG Wenyi

(School of Ecology and Environment, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** [Objective] Nitrogen and phosphorus pollution is commonly observed in the rivers of a city in southern China during rainy seasons. It is found that the main sources of pollution in this river are the rainfall runoff from surrounding roads and vegetable farmland alongshore the river. To further determine the contribution rate of farmland rainfall runoff to the pollution of the river, this study monitors and analyzes the output patterns and characteristics of pollutants of rainfall runoff from typical vegetable farmland alongshore the river. [Methods] In this study, a typical vegetable farmland along a river in a southern city was selected as the research object, and rainfall runoff was monitored from June 2022 to August 2022, including water level and flow velocity, and sampling points were set up to collect rainwater runoff, and the pH value of the water samples was adjusted to below 2 by adding acid to the site, and the suspended solids (SS), total phosphorus (TP), phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen and other indices of the water samples were subsequently detected and analyzed. [Results] It was showed that TP was the main pollutant in farmland rainfall runoff, with the average and maximum mass concentrations of 6.91 mg/L and 13.32 mg/L, respectively. Dissolved inorganic phosphorus was the main form of phosphorus discharge, accounting for 74% of TP on average. When rainfall scoured farmland, the initial scouring intensity of each pollutant was ranked as ammonia nitrogen > TP > SS > TN > dissolved organic matter (DOM), and the initial scouring effect was more likely to occur when continuous rainfall scoured farmland. [Conclusion] Through the study of this region, it is found that dissolved inorganic nitrogen and inorganic phosphorus in rainfall runoff are the main forms of nitrogen and phosphorus in runoff, and the main task

[收稿日期] 2023-05-15

[基金项目] 深圳市科技创新局(KJZD20230923114800002)

[作者简介] 张小磊(1980—),女,研究方向为污水处理及资源化、水体及管网监测,E-mail:zhangxiaolei@hit.edu.cn。

[通信作者] 王宏杰(1982—),男,研究方向为污水处理及水体修复,E-mail:whj1533@qq.com。

of controlling agricultural non-point source pollution in this region is to reduce phosphorus emissions.

**Keywords** farmland non-point source pollution rainfall runoff initial erosion river pollution phosphorus discharge

面源污染是指污染物从非特定地点,在降水(或融雪)的冲刷作用下,无序不均地通过径流汇入受纳水体并引起水体富营养化或其他形式的污染,一般分为城市和农业面源污染两大类<sup>[1]</sup>。农田降雨径流是农业面源污染主要来源之一,然而相比于城市面源污染的硬质地面降雨径流,农田降雨径流的污染物浓度和输出规律具有更复杂多变的特点,不仅同样受降雨强度、雨型、前期干旱时长等因素的影响,还受农作物种植种类、施肥种类和时间、农田地形等农业管理因素的影响<sup>[2-3]</sup>。研究者<sup>[4]</sup>以北运河上游流域(沙河水库以上)为研究对象发现,农业径流的总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)浓度较高,其浓度过程变化与降雨过程相关;且TP浓度超过了地表水V类水限值,其污染不容忽视。根据我国第二次全国地表水污染源普查,农业源在水污染物排放中占据了半数贡献量,其中农业源COD贡献率占比为50%,氨氮贡献率占比为22%,TN贡献率占比为47%,尤其TP贡献率占比高达67%<sup>[5]</sup>。与第一次全国地表水污染源普查相比,COD贡献率占比和TN贡献率占比分别增长了6%和10%,TP的高贡献率占比与之持平。这说明随着生活污水和工业废水的点源排放问题逐渐被控制,农业面源污染上升为地表水水质提升的主要问题。

同时,在不同的农业种植模式、作物类型下,降雨径流中的污染特征存在着一定的差异性。研究者<sup>[6]</sup>采用田间小区试验,分别监测玉米单种和玉米与其他作物间作、套作模式下氮、磷养分径流流失情况,发现所有间(套)作处理的降雨径流中的TN、TP浓度均小于玉米单作处理。其中,各处理的颗粒态磷流失可占地表径流磷流失的78.2%~81.9%。另有研究<sup>[7]</sup>显示,相对于水田而言,旱地(玉米地)的灌溉排水总量较小,但是地表径流中氮素中的硝态氮浓度较高,损失较大。原因是旱地土壤通风条件较好,有利于硝化作用。而水田的地表径流中氮肥以铵态氮的形式存在。同时相对于旱地而言,水田地表径流中的磷素流失较大。同时,研究者<sup>[8]</sup>对三峡库区规模化果园的降雨径流进行监测研究,发现规模化经营的果园降雨径流中氮、磷的初期冲刷效应十分明显,前期20%的地表径流贡献了约60%的

氮、磷负荷,径流TN和TP的质量浓度分别为8.49 mg/L和0.87 mg/L,远超国家地表水V类标准,且TN和TP的主要流失形式为硝态氮和可溶性磷。另有研究<sup>[9]</sup>显示,不同地形条件下茶园的地表径流中的氮、磷输出均表现出一定的初期冲刷效应,且地表径流中TN和TP的主要输出途径均为硝态氮和颗粒态磷。此外,当农田种植作物类型相同时,径流中的关键污染物也不尽相同。研究者<sup>[10]</sup>对大棚蔬菜地的降雨径流进行监测,表明在施基肥后的1个月是氮素的主要流失期,径流TN质量浓度为7.39~40.74 mg/L,一个月后下降至0.47~1.91 mg/L;径流TP质量浓度变化较小,为0.02~0.37 mg/L。另研究者<sup>[11]</sup>对大棚蔬菜的降雨径流进行监测,发现径流中COD和TN的污染程度较低,只有TP远超一级A排放标准,大棚蔬菜径流TP质量浓度为0.51~1.90 mg/L,随着降雨历时变化规律均为先缓慢增加达到峰值。由此可见,不同种植类型、地区的农田降雨径流污染物输出特点均存在较大差异,为更有效地控制农业面源污染的氮、磷排放,需对径流污染物输出规律和特征进一步研究。南方某城市河流雨季存在氮、磷超标问题,为有效控制河道污染,明确污染源十分重要。通过对河流周边环境调研发现,沿岸存在集中的农田区域,因此,可以推断,农业面源降雨径流很可能是河流氮、磷污染的主要来源之一,因其污染具有随机性、多变性、复杂性,对农田降雨径流中的污染物进行分析将有效指导氮、磷排河控制。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区以南方某城市河流沿岸典型蔬菜农田为例,城市属亚热带海洋性气候,年均气温为23.3℃,年均降水量为1932.9 mm,汛期为4月—9月,承担了全年86%的降雨。

城市河流沿岸农田分布十分集中,农业种植总面积约为3700亩(1亩=666.67 m<sup>2</sup>),其中有少量粮食作物(水稻)种植,其他则均种植经济植物(水果或蔬菜),蔬菜种植面积占总种植面积85%以上。蔬菜种植以葱、生菜、上海青、小白菜等叶菜为主,收获周期为1~2个月,采用井水喷灌或滴灌。农田施

有机肥,施肥周期为 7~10 d,每年平均施肥量约为 45 kg/亩,其中无秸秆、地膜等农用废弃物。

### 1.2 采样与监测

#### 1.2.1 降雨场次信息

2022 年 6 月—2022 年 8 月,进行了 13 次蔬菜

地农田降雨径流的监测,其中有效降雨监测场次共 5 次,有效降雨监测场次信息如表 1 所示。其中,降雨类型按照《降雨过程等级》(QX/T 489—2019)进行划分。

表 1 有效降雨监测场次信息

Tab. 1 Sites Information of Effective Rainfall Monitoring

序号	监测时间	降雨量/mm	降雨时长/min	径流时长/min	平均雨强/(mm·min <sup>-1</sup> )	雨前干旱时长/h	降雨类型
R-1	2022-06-15	2.7	30	65	0.09	16.0	小雨
R-2	2022-07-05	5.6	40	85	0.14	27.0	小雨
R-3	2022-08-04	31.4	130	260	0.24	0.5	大雨
R-4	2022-08-05	11.7	60	140	0.20	2.0	中雨
R-5	2022-08-10	10.6	230	230	0.05	4.0	中雨

#### 1.2.2 样品采集

于农业集中区选择一处操作性良好的基本农田进行降雨径流监测,采样点布设在过水断面形状规则的引水沟渠总集水口下游处,在降雨开始产生径流后每 5~10 min 采样 1 次,并同步监测水位和流速,直至径流结束,监测期间共采集样品 100 余个。水样采集后,于现场加稀硫酸调节水样 pH 值至 2 以下,带回实验室冷藏保存(4 ℃)后及时分析。

#### 1.2.3 样品检测

本研究对降雨径流中的 SS、有机物(COD/TOC)、TP、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)、TN、氨氮、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)进行分析,检测方法按照国家水质分析标准方法。

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 场次降雨径流污染物平均浓度

降雨径流污染物的浓度随降雨历时变化有一定的波动性,因此,使用流量加权的平均浓度表示一场降雨事件中地表径流的污染物浓度,如式(1)。

$$E_{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t} \quad (1)$$

其中: $E_{EMC}$ ——一场降雨事件中地表径流的污染物质量浓度,mg/L;

$c_t$ —— $t$ 时刻的降雨径流污染物浓度,mg/L;

$Q_t$ —— $t$ 时刻时降雨径流流量,m<sup>3</sup>/s;

$\Delta t$ ——监测时间间隔,min;

$M$ ——收集到  $V$  体积雨水中污染物总量,

kg;

$V$ ——收集的雨水体积,m<sup>3</sup>。

#### 1.3.2 初期冲刷效应

使用 Geiger 定义的无量纲  $M(V)$  曲线判断降雨事件中是否发生了初期冲刷效应,曲线在斜对角线上方时表示存在初期冲刷效应,且偏离中线的距离越远则初期冲刷效应越强。曲线横坐标为累计径流量占比  $V(t)$ ,纵坐标为累计污染物负荷占比  $M(t)$ ,可以定量地表述径流污染物的初期冲刷程度,如式(2)~式(3)。

$$M(t) = \frac{\int_0^t c_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^t c_i Q_i \Delta t}{M} \quad (2)$$

$$F = M(t_n) \quad (3)$$

其中: $F$ —— $FF_n$  指数,曲线上各点的含义为前  $n\%$  的降雨径流中所携带的累积污染负荷占比;

$M(t_n)$  ——累计污染物负荷占比。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨径流污染物输出规律

对研究区蔬菜地农田的降雨径流进行了污染物输出的动态监测,分析降雨径流中 SS、溶解性有机物(DOM)、TP、TN、氨氮的降雨历时变化规律。

#### 2.1.1 SS

R-2~R-5 降雨场次的径流 SS 浓度随降雨历时的变化过程如图 1 所示,这 4 场降雨的径流 SS 质量浓度分别为 229~937、46~471、48~473、5~

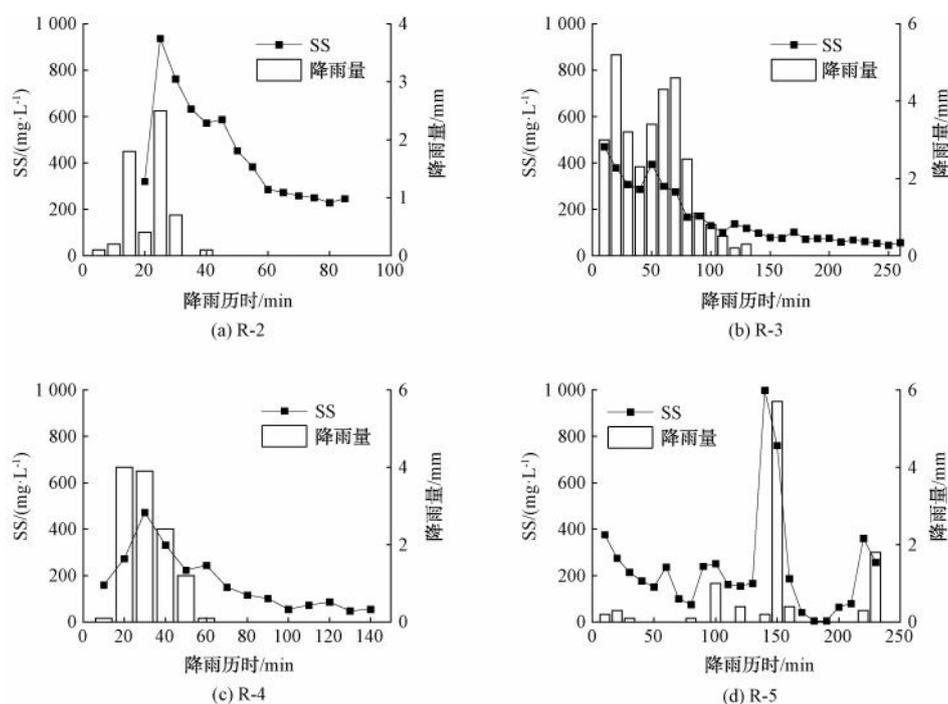


图 1 降雨径流中 SS 随降雨历时变化规律

Fig. 1 Variation Rule of SS with Rainfall Duration in Rainfall Runoff

999 mg/L,是硬质地面上降雨径流 SS 浓度的 2~5 倍<sup>[12-13]</sup>,主要原因是在农业面源污染中降雨的冲刷使农田中部分的浅层土随径流持续流失。农田降雨径流 SS 浓度受降雨强度影响较大,R-2 小雨冲刷下径流 SS 浓度是 R-3 大雨和 R-4 中雨冲刷下的 2 倍。径流 SS 的峰值大多出现在产流 30 min 内,之后累计降雨量增加,产流量增加,径流中的 SS 被稀释,从而逐渐降低。在持续性降雨结束时,产流量突然减小,从而导致径流 SS 浓度又会略微上升。降雨结束后土壤不再受到强烈冲刷,因此,径流 SS 浓度又很快下降后趋于稳定,径流后期稳定为 50~200 mg/L。径流 SS 浓度随降雨历时的变化趋势受雨型影响较小,在持续性降雨时整体上均呈现了快速上升后逐渐下降至稳定的规律,在非持续性的降雨中,径流 SS 浓度会因再次降雨冲刷而升高。

### 2.1.2 DOM

农业面源污染降雨径流中的有机物质包括颗粒态和溶解态,其中颗粒态有机物占比 90% 以上,由降雨冲刷下的土壤固体颗粒携带,且泥水混合的农田雨水径流极易沉淀,颗粒态有机物也随固体颗粒的沉降而被去除<sup>[14-15]</sup>,因此,研究主要关注了降雨径流中 DOM 的浓度变化规律。

R-1 和 R-2 两场降雨的溶解态 COD 质量浓度变化分别为 0~27 mg/L 和 5~20 mg/L(图 2),溶解态 COD 的浓度较低,因此,R-3、R-4、R-5 3 场降雨使用溶解态 TOC 来表示径流 DOM 含量,质量浓度变化分别为 6~23、13~20、31~47 mg/L。DOM 随降雨历时变化规律如图 2 所示,在降雨过程中,径流中 DOM 的浓度稳定在一定的范围内,不随雨强、雨型和降雨历时的变化而显著变化。径流溶解态 COD 质量浓度低于 30 mg/L,溶解态 TOC 质量浓度低于 50 mg/L,说明 DOM 不是流域面源污染的主要污染物,农田降雨径流经过简单沉降后,有机物浓度即可达到较低水平。

### 2.1.3 TP

5 场降雨的径流 TP 质量浓度分别为 2.37~3.81、3.71~12.92、1.54~8.16、1.60~9.73、1.90~13.32 mg/L,超出地表水 V 类标准 4~34 倍,随降雨历时的变化过程如图 3 所示。R-1 由于降雨强度很小,未对农田土壤构成强烈的冲刷,径流 TP 质量浓度整体较低,但依然达到了 3 mg/L 左右。在 R-2 的小雨冲刷时,开始产流后的径流中 TP 浓度也呈现出快速升高又降低的趋势,但在降雨结束后又逐渐增加,甚至高过降雨初期,最高质量浓度可达 13

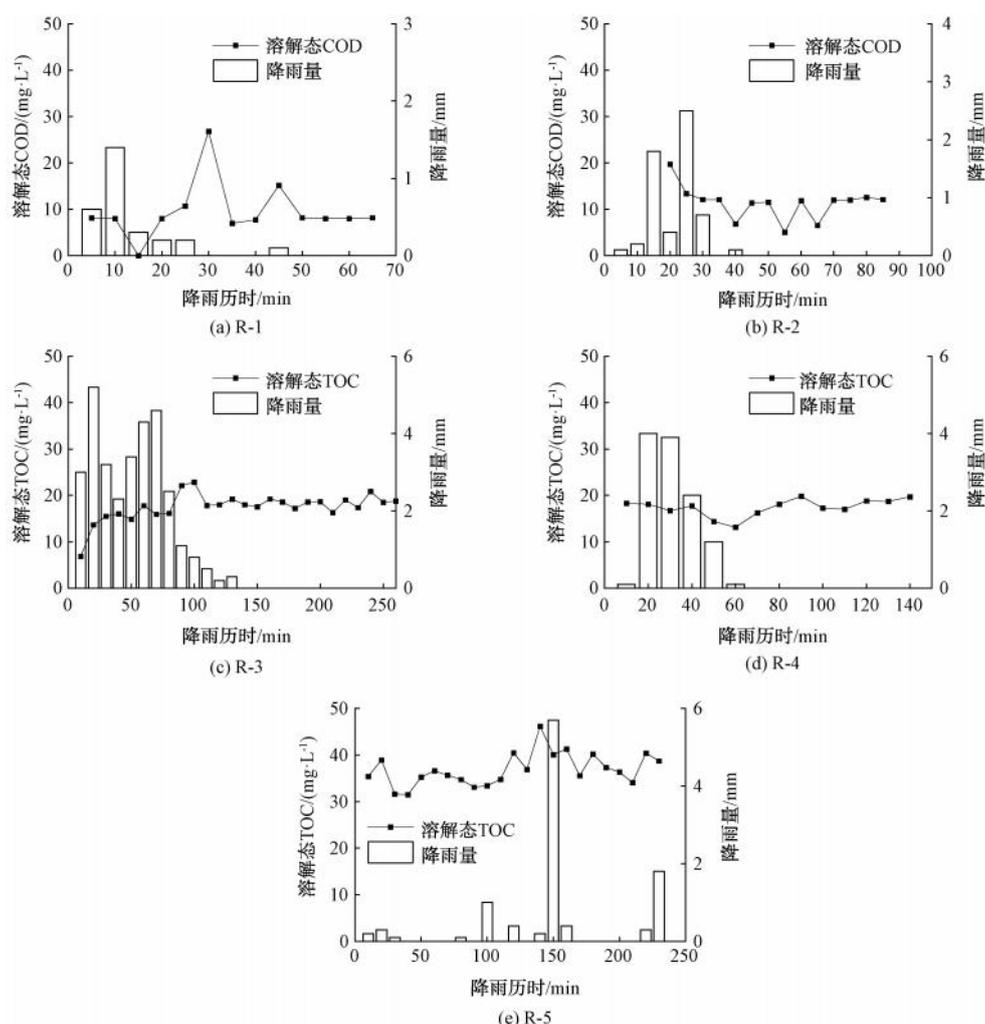


图2 降雨径流中 DOM 随降雨历时变化规律

Fig. 2 Variation Rule of DOM with Rainfall Duration in Rainfall Runoff

mg/L。在 R-3 的大雨和 R-4 的中雨冲刷下,径流 TP 浓度表现出更明显的初期冲刷趋势,在降雨初期 TP 质量浓度较高,为 6~10 mg/L,之后随降雨历时逐渐降低,在降雨后期逐渐稳定为 2 mg/L 左右。R-5 虽然为非持续性的阵雨,也呈现出在每次降雨冲刷时径流中 TP 浓度快速升高又降低的趋势。相比于其他污染物,农田降雨径流中的 TP 表现出较强的污染特点,且在不同强度的降雨冲刷下表现出不同的变化规律,可对较高浓度的径流收集处理或回灌,即降雨开始后 1 h 内的径流以及小雨结束后的径流。

#### 2.1.4 TN

5 场降雨的径流 TN 质量浓度分别为 3.83~10.96、2.87~9.25、4.55~8.14、3.45~7.35、3.56~16.48 mg/L,随降雨历时的变化过程如图 4 所示。在 R-1 和 R-2 的小雨中,径流 TN 的初期冲刷趋势

比在 R-3 的大雨和 R-4 的中雨中更明显,且在每场降雨结束后径流 TN 也会略微升高。R-5 阵雨冲刷下的 TN 表现出极强的不规律性,但每小段降雨结束后的径流 TN 浓度也逐渐升高,再次降雨时径流 TN 被稀释而导致浓度又降低,与集中性降雨的冲刷规律一致。这说明对于不同强度、特点的降雨,较高 TN 浓度的径流均为降雨初期和降雨结束后的径流。农田降雨过程中的径流 TN 质量浓度基本均低于 15 mg/L,低于流域当地污水厂出水水质标准。

#### 2.1.5 氨氮

5 场降雨的径流氨氮质量浓度分别为 0.02~1.66、0.13~1.13、0.50~2.57、0.52~3.55、0.54~3.99 mg/L,随降雨历时的变化过程如图 5 所示。在 R-1 和 R-2 小雨冲刷时,无明显前期冲刷趋势,但径流氨氮质量浓度全程都低于 2 mg/L。在 R-3 大雨

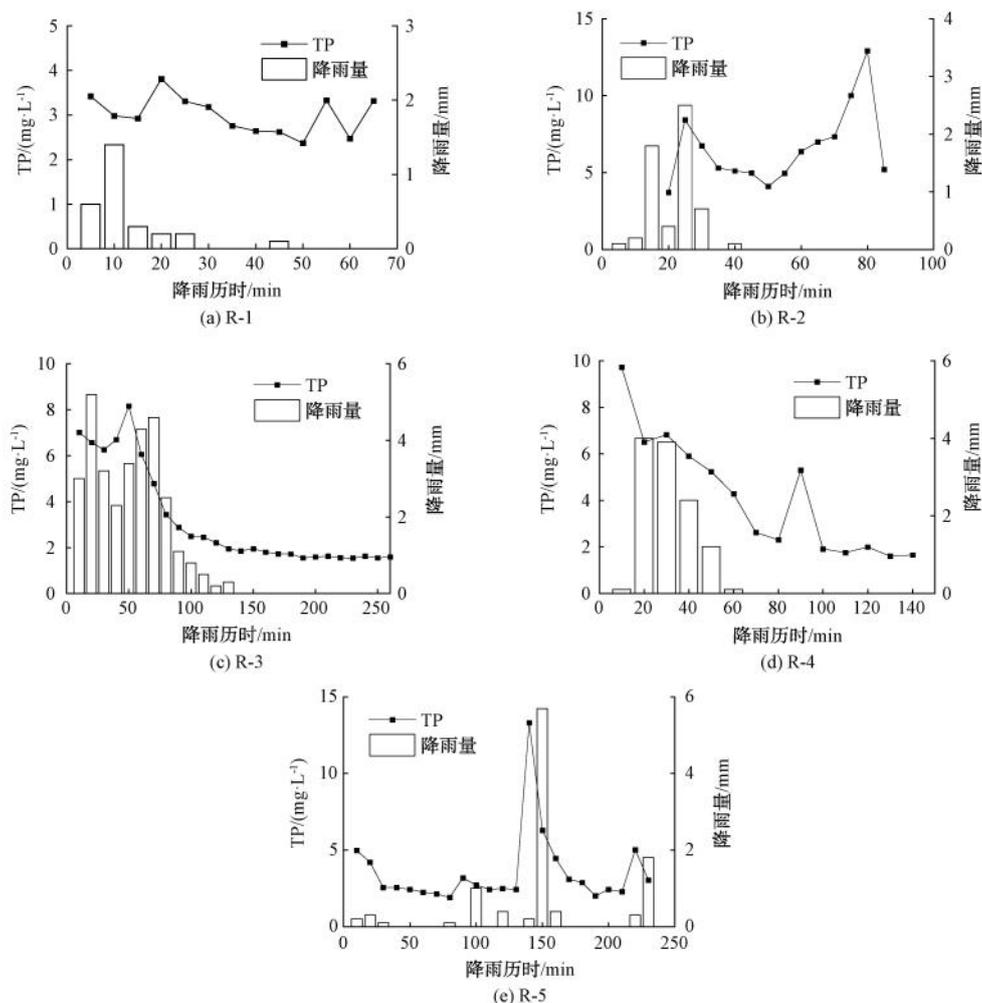


图3 降雨径流中 TP 随降雨历时变化规律

Fig. 3 Variation Rule of TP with Rainfall Duration in Rainfall Runoff

和 R-4、R-5 中雨的冲刷下有较明显的前期冲刷趋势,在降雨前期 20~40 min 时,径流氨氮质量浓度可达到 3~4 mg/L,之后迅速下降稳定在 1 mg/L 左右。农田降雨过程中的径流氨氮质量浓度均低于 5 mg/L。

### 2.1.6 径流污染物平均浓度

对产流量较大的 R-3、R-4、R-5 场次降雨的各类污染物计算次降雨事件的平均浓度 (EMC) 和污染负荷,结果如表 2 所示。在农业面源污染水量远小于点源排水量的情况下,采用流域内水质净化厂的准 V 类出水标准 (COD ≤ 40 mg/L, 氨氮 ≤ 2 mg/L, TP ≤ 0.4 mg/L, TN ≤ 20 mg/L) 判断农田降雨径流污染物的污染程度。在此标准下,由各污染物 EMC 可直观看出,DOM、TN 和氨氮均不是本研究区农业面源污染的主要污染物;而 TP 的平均浓度超出上述标准

中规定浓度的 15~34 倍,说明控制农田降雨径流中的磷排放是控制农业面源污染的主要任务。

## 2.2 降雨径流污染物形态特征变化规律

### 2.2.1 磷素形态特征

5 场降雨的径流有机磷质量浓度分别为 0~1.54、0.13~10.13、0.20~3.73、0.01~1.24、0.07~2.09 mg/L; 径流无机磷质量浓度分别为 1.64~3.61、2.66~3.95、1.20~4.43、1.49~9.08、1.37~11.23 mg/L。由图 6 可知,农田降雨径流中磷的存在形态以溶解态的无机磷为主,5 场降雨径流中无机磷在 TP 中的占比分别为 52%~100%、22%~92%、54%~87%、82%~99%、61%~99%,磷的流失形态在小雨和大雨冲刷下呈现出不同的降雨历时变化规律。在 R-2 的小雨冲刷时,产流前期无机磷占比相对较高,随降雨历时逐渐降低,但在降雨结束后

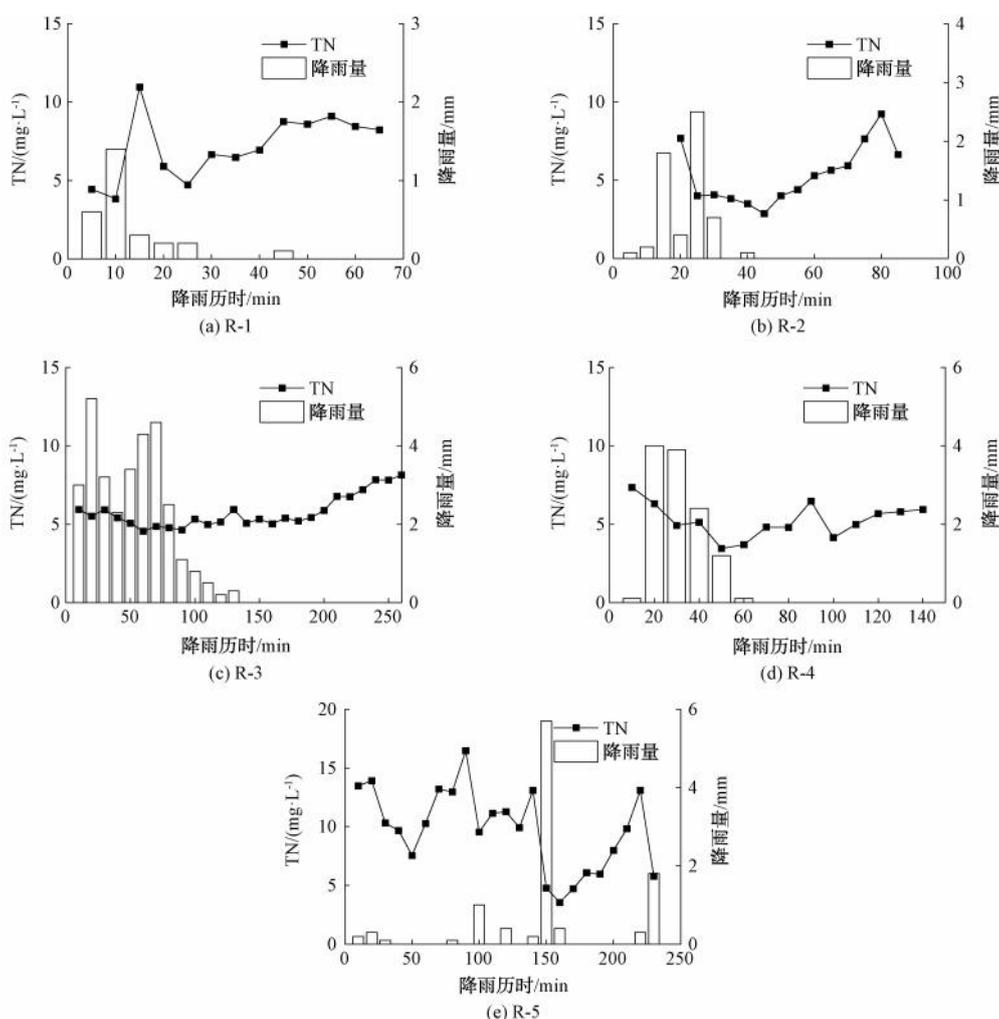


图 4 降雨径流中 TN 随降雨历时变化规律

Fig. 4 Variation Rule of TN with Rainfall Duration in Rainfall Runoff

的径流中有机磷占比又逐渐增加。在 R-3 的大雨和 R-4 的中雨冲刷时,降雨前期的径流中存在着一定比例的有机磷,之后有机磷占比随降雨历时逐渐降低,溶解态无机磷成为径流中磷的主要流失形态,占比达到 80% 以上。对 SS 和 TP 进行相关性分析,线性相关系数  $R^2$  分别为 0.43、0.94、0.42、0.82,两者相关性十分不稳定,因此,使用 SS 的值代表 TP 的污染程度不可靠。

### 2.2.2 氮素形态特征

5 场降雨的径流有机氮质量浓度分别为 0~2.72、0.89~6.77、0~2.50、0.04~3.25、0~4.91 mg/L; 径流无机氮质量浓度分别为 3.84~10.27、1.83~3.40、3.17~8.25、1.94~6.45、1.90~12.25 mg/L。由图 7 可知,农田降雨径流中氮的存在形态以溶解态的无机氮为主,并且溶解态的无机氮又以  $\text{NO}_3^-$ -N

为主。5 场降雨径流中无机氮在 TN 中的占比分别为 70%~100%、26%~87%、57%~100%、37%~100%、40%~100%,且氮的流失形态在小雨和大雨冲刷下呈现出不同的降雨历时变化规律。在 R-2 的小雨冲刷时,降雨前期的径流中无机氮的占比较高,占 TN 的 80% 以上,随着降雨和径流的结束,有机氮在 TN 中的占比逐渐增加。R-3 的大雨和 R-4 的中雨冲刷时,在雨强较大的前期,有机氮在 TN 中的占比在 40%~60%,当雨强减小及降雨结束后,无机氮就在 TN 中的占了主要部分,占比达到 85% 以上。对 SS 和 TN 进行相关性分析, $R^2$  分别为 0.52、0.14、0.04、0.03,相关性较弱,伴随 SS 流失的氮比例较低,因此,使用 SS 的值代表 TN 的污染程度存在一定的局限性。

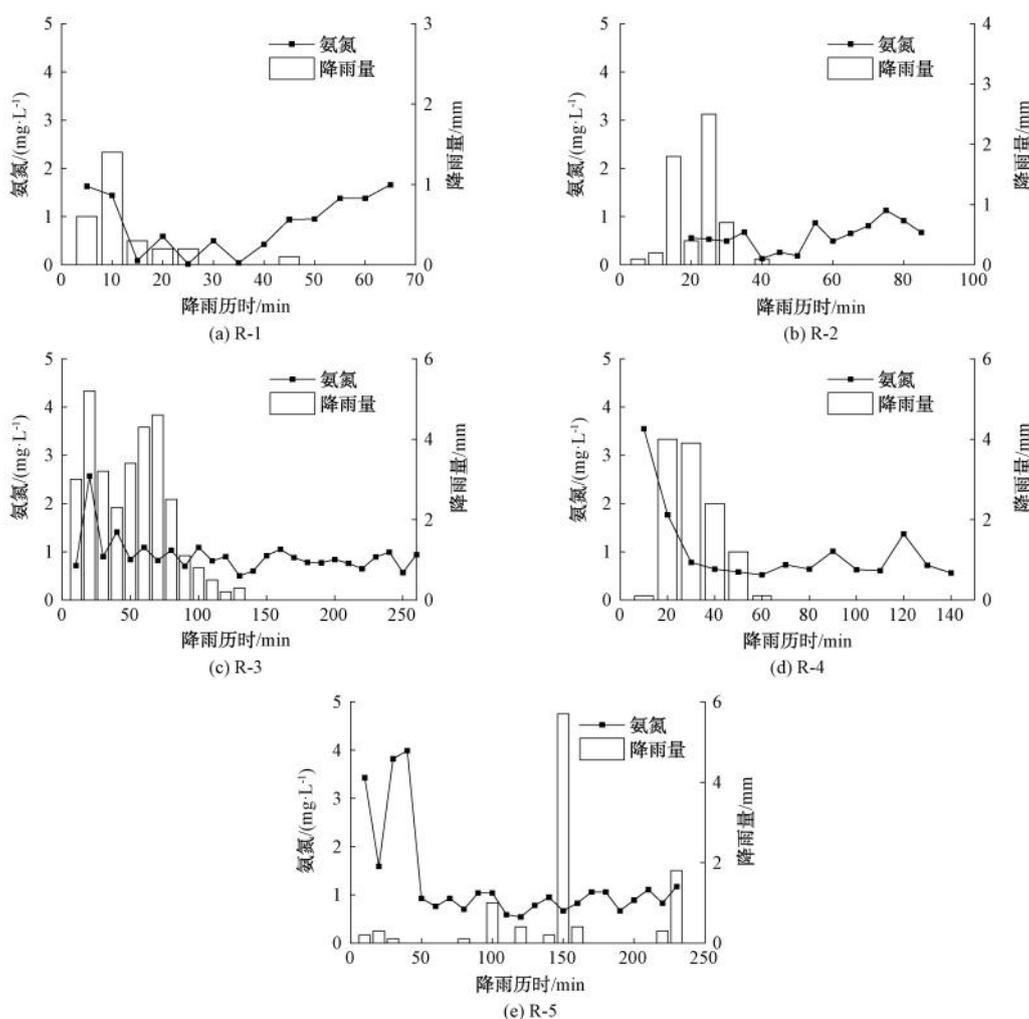


图5 降雨径流中氨氮随降雨历时变化规律

Fig.5 Variation Rule of Ammonia Nitrogen with Rainfall Duration in Rainfall Runoff

表2 R-3-5 场次降雨的 EMC 和污染负荷

Tab.2 EMC and Pollution Load of R-3-5 Sites Rainfall

项目	场次	SS	TOC	TP	无机磷	有机磷	TN	氨氮	NO <sub>3</sub> -N	有机氮
EMC/(mg·L <sup>-1</sup> )	R-3	268	16.01	5.11	3.06	2.05	5.29	1.07	3.13	1.08
	R-4	248	17.04	5.64	5.05	0.58	5.15	1.23	2.39	1.65
	R-5	532	40.24	6.91	5.89	1.02	10.11	1.18	6.14	2.80
污染负荷/kg	R-3	9.97	0.59	0.19	0.11	0.08	0.20	0.04	0.12	0.04
	R-4	8.05	0.55	0.18	0.16	0.02	0.17	0.04	0.08	0.05
	R-5	8.09	0.61	0.11	0.09	0.02	0.15	0.02	0.09	0.04

### 2.2.3 氮、磷形态特征分析

农田降雨径流中氮、磷的流失形态在降雨冲刷中表现出较一致的变化规律。有机氮和有机磷浓度较高的径流均出现在小雨冲刷结束后的径流和大雨冲刷前期的径流中。有机氮和有机磷大多为附着于

表层疏松土壤上的颗粒态形式,随着土壤被冲刷而流失,这部分氮、磷易随土壤颗粒的沉降而被去除,可通过增强土壤抗冲刷性能和降雨径流收集沉淀处理的途径控制农业面源污染中的有机态氮、磷。而溶解态的无机氮、磷在 TN、TP 中平均占比分别为

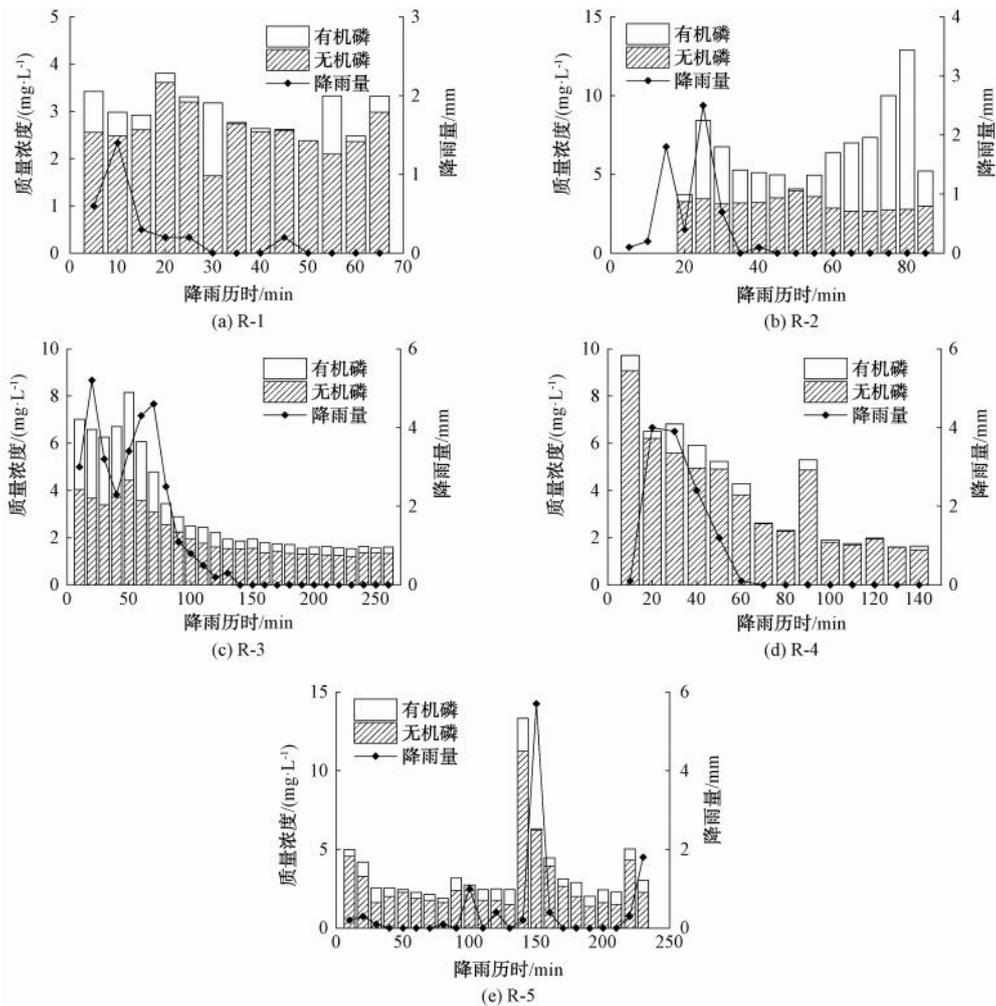


图6 降雨径流中磷的输出形态

Fig. 6 Forms of Phosphorus Output in Rainfall Runoff

78%、74%，是农田降雨径流中氮磷的主要流失形态。这说明控制径流中溶解态的无机氮和无机磷是降低农业面源污染氮磷排放的有效途径。

### 2.3 初期冲刷效应分析

降雨径流污染物的  $M(V)$  曲线是表示累积污染负荷和累积径流量关系的曲线，可以直观且定性表示径流污染物的初期冲刷效应，曲线在中线的上方表示存在初期冲刷效应，曲线偏离中线的距离越远表示初期冲刷效应越强。使用  $M(V)$  曲线对径流量较大的 3 场降雨 R-3、R-4、R-5 的初期冲刷程度作定性分析，各项污染物的  $M(V)$  曲线如图 8 所示。由图 8 可知，SS、TP、TN 和氨氮的  $M(V)$  曲线基本均在中线上方，说明均发生了初期冲刷，但偏离中心的距离不同，说明其冲刷程度也不同，其中氨氮的初期冲刷程度最明

显。而 TOC 的  $M(V)$  曲线基本与中线持平，几乎未出现初期冲刷效应。各污染物初期冲刷强度排序为氨氮 > TP > SS > TN > DOM。此外，SS、TP 和 TN 的  $M(V)$  曲线距中线的最远点对应的累计径流比例都比较靠后，说明这 3 种污染物的初期冲刷持续时间更长，要更高的累计径流量才能携带较大比例的污染负荷。

对不同场次降雨的各项污染物初期冲刷程度进行对比，R-5 的初期冲刷效应是最弱的，这是 R-5 为非持续性降雨，频繁的降雨状态的改变导致了农田径流中污染物浓度变化趋势随之不断地变化，说明初期冲刷强度受雨型影响较大，在持续性的降雨冲刷农田时更易出现初期冲刷效应。

$FF_n$  表示前  $n\%$  降雨径流所携带的累积污染负荷比例，可以定量地表述径流污染物的初期冲刷程

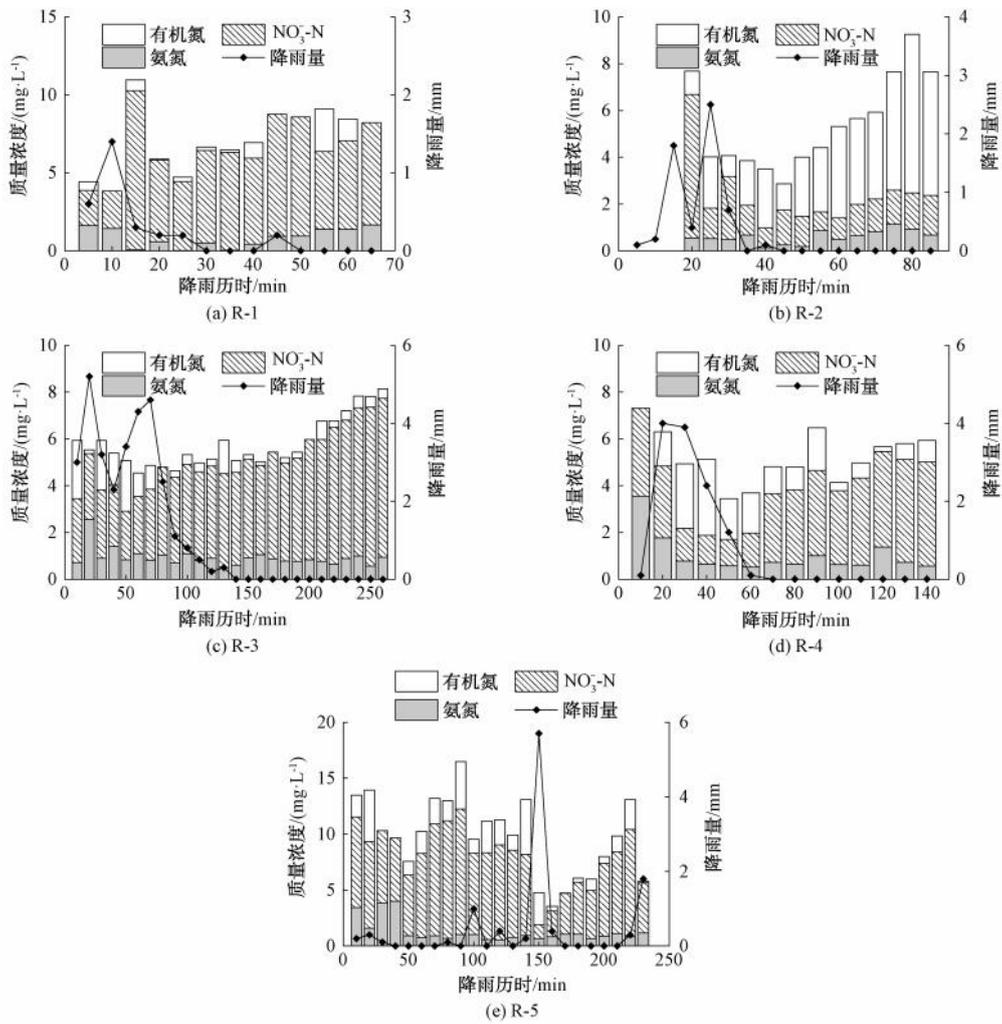


图7 降雨径流中氮的输出形态

Fig. 7 Forms of Nitrogen Output in Rainfall Runoff

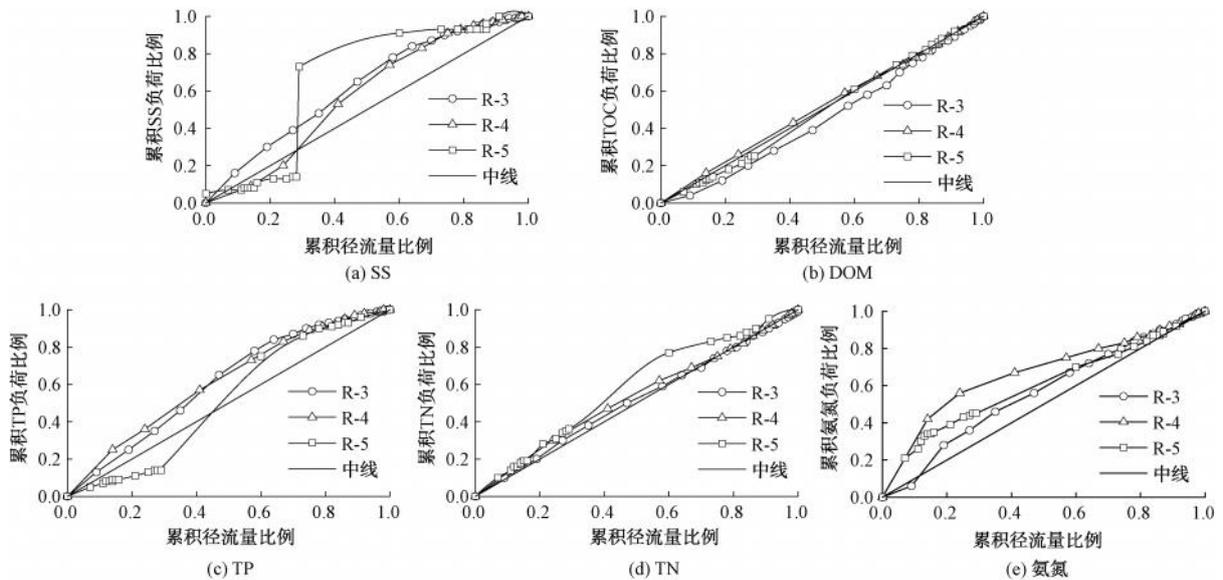


图8 污染物的M(V)曲线

Fig. 8 M(V) Curve of Pollutants

度,例如  $FF_{30}$  表示前 30% 径流所携带的累积污染负荷比例。对 R-3、R-4、R-5 的初期冲刷效应作定量分析,各污染物  $FF_{30}$ 、 $FF_{40}$ 、 $FF_{50}$  值如表 3 所示。由表 3 可知,TP、TN、氨氮的  $FF_{30}$  大多都处于 30%~45%,即初期冲刷的程度较弱 ( $30\% \leq FF_{30} < 45\%$ )。由  $FF_{50}$  的值可知,当径流累计比例为 50% 时,污染负荷累计比例才能达到 60%~70%,说明至少要控制前 50% 的农业雨水径流才能有效地减少农业面源污染的氮、磷排放负荷。

表 3 初期冲刷效应的量化分析  
Tab. 3 Quantitative Analysis of Initial Scour Effects

$FF_n$	降雨场次	TP	TN	氨氮	TOC	SS
$FF_{30}$	R-3	39%	33%	40%	23%	42%
	R-4	43%	36%	60%	32%	32%
	R-5	16%	37%	46%	26%	16%
$FF_{40}$	R-3	54%	43%	50%	33%	55%
	R-4	56%	46%	66%	42%	51%
	R-5	36%	51%	54%	38%	35%
$FF_{50}$	R-3	69%	52%	59%	43%	69%
	R-4	66%	55%	72%	52%	65%
	R-5	55%	64%	62%	49%	54%

### 3 结论

(1) 蔬菜地农田降雨径流中 DOM、TN 和氨氮浓度均低于当地污水厂排放标准,不是本研究区农业面源污染的主要污染物;而 TP 的平均质量浓度和最高质量浓度分别为 6.91 mg/L 和 13.32 mg/L,超出地表水 V 类标准 15~34 倍,表现出较强的污染特点,说明控制农田降雨径流中的磷排放是控制农业面源污染的主要任务。

(2) 氮、磷输出的形态特征受雨强、雨型和降雨历时的影响,但变化规律相似。在大雨和小雨的冲刷下,降雨前期的径流中都存在着相当比例的颗粒态有机氮、磷,且随降雨历时逐渐降低,溶解态的无机氮、磷成为径流中氮、磷的主要输出形式。但在小雨冲刷时,降雨结束后径流中的颗粒态有机氮、磷占比又会逐渐增加。整体来看,溶解态无机氮、磷在 TN、TP 中的平均占比分别为 78%、74%,说明控制降雨径流中溶解态的无机氮和无机磷是降低农业面源污染氮磷排放的有效途径。

(3) 在降雨冲刷农田时,SS、TP、TN 和氨氮均出现了初期冲刷效应,而 DOM 几乎未出现初期冲刷

效应,各污染物初期冲刷强度排序为氨氮>TP>SS>TN>DOM,且在持续性的降雨冲刷农田时更易出现初期冲刷效应。

### 参考文献

- [1] 李艳华,王彬邴,李弘,等. 农业面源污染综合治理工程系统设计案例[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 167-173.  
LI Y H, WANG B L, LI H, et al. Case study of system design of integrated control project for agricultural non-point source pollution[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 167-173.
- [2] 邱青彬,杨玉秀,牛梦姣,等. 基于 GIS 的河南省沿黄区域农业面源污染分析[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(4): 558-569.  
QIU Q B, YANG Y X, NIU M J, et al. GIS-based analysis of agricultural non-point source pollution in regions along the Yellow River in Henan Province [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(4): 558-569.
- [3] 陈森,王振北,刘龙严,等. 城镇降雨径流污染控制典型工程案例绩效评估[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 84-89, 120.  
CHEN M, WANG Z B, LIU L Y, et al. Performance evaluation of urban rainfall runoff pollution control for typical project cases [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 84-89, 120.
- [4] 唐丽媛. 北运河上游流域农业面源污染特征及治理措施[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.  
TANG L Y. Characteristics and control measures of agricultural non-point source pollution in the upper Beiyun River basin[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [5] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[R/OL]. (2020-06-08) [2023-05-15]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/W020200610353985963290.pdf>.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China's second national census on the sources of pollution[R/OL]. (2020-06-08) [2023-05-15]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/W020200610353985963290.pdf>.
- [6] 陈红日,张玉平,刘强,等. 玉米间套作模式对地表氮磷流失的影响与经济效益分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 117-123.  
CHEN H R, ZHANG Y P, LIU Q, et al. Effects of different intercropping on nitrogen and phosphorus runoff loss from dry land and crop production efficiency [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(2): 117-

- 123.
- [ 7 ] 洪林,李瑞鸿.南方典型灌区农田地表径流氮磷流失特性[J].地理研究,2011,30(1):115-124.  
HONG L, LI R H. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in surface runoff from farmland in a typical irrigation district in southern China[J]. Geographical Research, 2011, 30(1): 115-124.
- [ 8 ] 严坤.三峡库区农业生产方式改变及其对水土流失与面源污染影响——以万州区五桥河流域为例[D].成都:中国科学院大学,2020.  
YAN K. Changes in agricultural production activity and its impacts on the soil erosion and non-point source pollution in the three gorges reservoir area: A case study of the Wuqiaohe watershed in Wanzhou District [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [ 9 ] 陈开放.不同降雨和施肥条件下茶园坡地地表径流和壤中流氮磷流失通量研究[D].郑州:郑州大学,2020.  
CHEN K F. Study on the loss flux of nitrogen and phosphorus in tea garden slopes under different rainfall and fertilization conditions[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [ 10 ] 陈乾.菜地环保施肥及其径流氮磷减排技术研究[D].杭州:浙江大学,2018.  
CHEN Q. Environmental friendly fertilization and runoff N/P emission reduction technology in vegetable fields [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [ 11 ] 罗楠.滇池东岸大棚种植区农业面源污染模拟及高效截流方法研究[D].重庆:重庆大学,2016.  
LUO N. Simulation Study on agricultural non-point source pollution and efficient closure in greenhouse region in the east coast of Dianchi Basin [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [ 12 ] 任玉芬,王效科,欧阳志云,等.北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J].环境科学,2013,34(1):373-378.  
REN Y F, WANG X K, OUYANG Z Y, et al. Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city[J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 373-378.
- [ 13 ] 王显海,来庆云,杜靖宇,等.宁波市城区不同下垫面降雨径流水质特征分析[J].环境工程,2016,34(s1):312-316.  
WANG X H, LAI Q Y, DU J Y, et al. Analysis on water-runoff pollutions of different underlying surfaces in Ningbo [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(s1): 312-316.
- [ 14 ] QICHUN Z, HAIDER I S, JINWEN W, et al. Surface runoff and nitrogen (N) loss in a bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest under different fertilization regimes [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013, 20(7): 4681-4688.
- [ 15 ] 田艳,马友华,胡宏祥,等.农田土壤中氮的环境指标研究[J].中国农学通报,2017,33(7):142-147.  
TIAN Y, MA Y H, HU H X, et al. Environmental indicator of soil nitrogen in farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(7): 142-147.

## (上接第77页)

- [ 18 ] 尹文选,赫俊国,张道义,等.超滤纳滤双膜工艺处理珠江西航道水源水的试验研究[J].给水排水,2024,50(7):54-62.  
YIN W X, HE J G, ZHANG D Y, et al. Experimental study on the treatment of Pearl River Western Navigation Channel raw water by ultrafiltration-nanofiltration dual membrane process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(7): 54-62.
- [ 19 ] 钟志聪,赫俊国,吴学伟,等.臭氧活性炭工艺处理多种新污染物复合污染研究[J].给水排水,2024,50(3):1-11.  
ZHONG Z C, HE J G, WU X W, et al. Study on the treatment of multiple new pollutant compound pollution by ozone activated carbon process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(3): 1-11.
- [ 20 ] 陈燕波,潘名宾,司徒菲,等.基于饮用水安全优质保障的全流程水厂设计思考[J].净水技术,2022,41(7):1-6.  
CHEN Y B, PAN M B, SITU F, et al. Consideration on the design of whole-process waterworks based the safety and quality guarantee of drinking water[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 1-6.