

长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 沈根祥, 张敏, 付侃, 王振旗, 赵庆节

引用本文:

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 等. 长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2167-2178.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0323>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究

薛鹏程, 庞燕, 项颂, 胡小贞, 王欣泽

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1362-1368 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0382>

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174-184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究

陈秋会, 席运官, 王磊, 李妍, 张弛, 田伟, 田然, 肖兴基, 赵克强

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1550-1558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0102>

洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价

谢坤, 罗元, 冯弋洋, 何秋平, 张克强, 沈仕洲, 王凤

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2387-2396 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0741>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 等. 长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2167–2178.

ZHU W J, LI J W, QIAN X Y, et al. Runoff production process and nitrogen and phosphorus output characteristics from farmlands in the lower reaches of the Yangtze River under cauliflower and corn rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(10): 2167–2178.



开放科学 OSID

长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究

朱文俊^{1,2}, 李金文², 钱晓雍², 沈根祥^{2*}, 张敏², 付侃², 王振旗², 赵庆节²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护新型污染物环境健康影响评价重点实验室, 上海 200233)

摘要: 农田氮(N)、磷(P)的流失是水体富营养化的主要原因, 然而农田径流N、P浓度与流失量受到前期土壤含水率(AMC)、降雨量、翻耕等多种因素影响, 尚缺乏田间监测方法。本研究以位于长江下游的崇明岛旱地为研究对象, 建立自动取样方法, 在天然降雨条件下对农田径流量和水质进行高频率取样与连续监测, 分析“玉米-花菜”轮作模式下降雨产流过程及N、P输出特征, 采用径流曲线数(CN)表征土壤的持水能力, 研究10、30、50 cm深处土壤AMC(AMC₁₀、AMC₃₀、AMC₅₀)对CN的影响, 并利用电导率(EC)来反映径流离子浓度的变化趋势以及降雨的稀释效应。结果表明: 农田径流峰值滞后于降雨峰值, CN值取值范围为37~88, 且与AMC₁₀线性关系最好($y=293.40x-39.41$, $R^2=0.7905$, $P<0.01$), 与AMC₅₀无显著相关关系; 秸秆还田后的翻耕导致总磷(TP)和溶解性总磷(DTP)浓度升高, 夏季翻耕显著增加了P浓度, 但N的浓度没有增加; 径流N浓度随着径流速度的增大而减小, 但P浓度相反。EC与径流速度呈现出完全相反的变化趋势, 降雨量增加了径流流量并产生了稀释效应, 导致EC下降, 且EC可以反映总氮(TN)、NO₃-N的浓度变化, EC的变化可充分反映N的输出特征, 而P的输出与N输出不同, 当径流速度较大且EC较低时, P的浓度可能较高; NO₃-N、DTP分别是农田N、P输出的主要形式, 径流流量和养分浓度差异影响N、P的输出负荷, 但养分浓度差异对NH₄⁺-N、TP、DTP输出负荷的影响要大于径流流量对其的影响。

关键词: 天然降雨; 面源污染; 崇明岛; 农田径流

中图分类号: X52; X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)10-2167-12 doi:10.11654/jaes.2021-0323

Runoff production process and nitrogen and phosphorus output characteristics from farmlands in the lower reaches of the Yangtze River under cauliflower and corn rotation

ZHU Wenjun^{1,2}, LI Jinwen², QIAN Xiaoyong², SHEN Genxiang^{2*}, ZHANG Min², FU Kan², WANG Zhenqi², ZHAO Qingjie²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Health Impact Assessment of Emerging Contaminants, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Nitrogen(N) and phosphorus(P) losses from farmlands are major causes of water eutrophication. The N and P nutrient runoff rates are affected by various factors, such as antecedent moisture content(AMC), rainfall levels, and tillage management, of which on-site monitoring methods are still unavailable. This study established an automatic sampling method to achieve high-frequency sampling and

收稿日期: 2021-03-18 录用日期: 2021-08-04

作者简介: 朱文俊(1996—), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防控研究。E-mail: 1249901931@qq.com

*通信作者: 沈根祥 E-mail: shengx@saes.sh.cn

基金项目: 上海市生态环境局科研项目(沪环科[2020]第5号)

Project supported: The Scientific Research Fund of the Shanghai Ecological Environment Bureau([2020]05)

continuous monitoring of nutrient runoff loss under natural rainfall conditions. The study was conducted at an upland on Chongming Island, located in the lower reaches of the Yangtze River. The characteristics of rainfall runoff and N and P output under the corn-cauliflower rotation cropping system were analyzed. The soil water holding capacity was indicated by the *CN*, and the effect of *AMC* on *CN* at soil depths of 10, 30 cm, and 50 cm (*AMC*₁₀, *AMC*₃₀, *AMC*₅₀) was studied. The change in nutrient output and the dilution effect of rainfall were studied using electrical conductivity (*EC*). The results showed that the peaks of the runoff velocity lagged behind that of the rainfall intensity. The *CN* of the field ranging from 37 to 88 was most significantly correlated with *AMC*₁₀ ($y=293.40x-39.41$, $R^2=0.7905$, $P<0.01$), but was not significantly correlated with *AMC*₅₀ ($P>0.05$). Plowing led to an increase in total P (*TP*) and dissolved total P (*DTP*) concentrations but had no obvious influence on the N concentrations. N concentrations in runoff decreased when runoff velocity increased, but P concentrations exhibited the opposite trend. The changes in *EC* and runoff velocity showed a completely opposite trend. Higher rainfall resulted in an increase in runoff flow, and the consequent dilution effects resulted in a decrease in *EC*. The changes in *EC* could reflect the concentration changes of total N (*TN*) and NO_3^- -N, and the output characteristics of N. However, the output of P was different from the output of N. During events with higher runoff rates and lower *EC*, the concentration of P might be higher.

Keywords: natural rainfall; non-point source pollution; Chongming Island; farmland runoff

农田径流污染是指在雨水的淋溶和冲刷作用下,大气沉降物以及农田里各种养分随径流进入水环境造成的污染^[1]。其中不同形态的氮(N)和磷(P)是农田径流中的主要污染物^[2],是水质恶化的主要原因之一^[3],也是农业面源污染的主要来源^[4-5]。根据第二次全国污染源普查公报^[6],种植业总氮(TN)年排放量为71.95万t,总磷(TP)年排放量为7.62万t,分别占农业源水污染排放量的50.85%和35.94%。这主要是由于在目前的栽培管理条件下,肥料利用率较低,N利用率约为40%~50%,P利用率仅为10%~20%,有一半以上的N、P养分通过降雨-径流过程进入到了水体^[7],会造成水体富营养化^[8-9],因此,精确掌握农田降雨产流特征和N、P流失浓度变化特征是农田面源污染控制的前提。然而,由于农田径流具有偶发性、随机性和隐蔽性的特点,监测难度较大,导致目前对降雨径流过程及径流中污染物特征的研究多集中在城市和流域径流^[10-13],针对农田径流的研究则大多是在模拟降雨条件下进行的^[14-15],缺乏田间尺度的原位监测。因此,开展天然降雨条件下农田面源污染流失规律的田间原位监测研究对于农田面源污染的防控尤为重要。

旱地农田因其表面不蓄水,降雨产生的径流直接排入外界水环境中,造成大量的氮磷流失。截至2016年末,我国共有旱地农田6 673万hm²,占全部耕地的49.43%^[16]。崇明岛被称为“中国花菜之乡”,位于长江下游,花菜种植以旱地“玉米-花菜”轮作为主。而长江下游由于雨量充沛,旱地土壤呈现干湿交替的特征,导致田间持水能力发生变化,进而影响农田面源污染的输出。换茬时的翻耕、整地等操作可能会加剧农田面源污染的输出,从而导致农田面源污染发生

过程较为复杂。关荣浩等^[17]在冀南地区采用人工模拟降雨的方法研究农田旱地流失特征,结果表明径流中N浓度在产流初期较高,随后迅速衰减,N的输出以 NO_3^- -N为主,而P在径流中的浓度较低。王永尚^[18]在自然降雨条件下对南方湿润平原农田进行的研究表明,农田地表径流中TN、TP的流失量随着降雨量及施肥量的增加而增大, NO_3^- -N是可溶态N的主要形态。向速林等^[19]在自然降雨条件下对赣江下游农田旱地的研究表明施肥和降雨量是影响农田径流N、P流失的主要因素。目前针对崇明岛旱地N、P流失的研究较少,且由于旱地农田与水稻田相比产流较少,因此对崇明岛农田旱地径流长期精确监测的研究更加必要。

本文以崇明岛典型“玉米-花菜”轮作旱地为研究对象,在天然降雨条件下对农田产流过程进行连续监测,并对径流中携带的N、P污染物进行分析,明确农田产流和N、P输出过程,探明典型种植模式下农田面源污染输出特征,旨在为农田径流中N、P污染的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海市崇明岛向化镇(121°44'E, 31°33'N, 图1)。崇明岛为上海市最大的蔬菜基地,耕地面积达7 333 hm²。该地区是典型的亚热带季风气候,年平均气温为15.8℃,日照充足,年均日照1 973.9 h,雨水充沛,年均降水量1 128.9 mm,大部分降雨发生在6—8月份。监测点农田总面积约为1.18 hm²,呈矩形,以“玉米-花菜”轮作为主,2020年4月25日施用商品有机肥14.99 t·hm⁻²(N: 67.46 kg·hm⁻²;

P_2O_5 : $37.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 并移栽玉米, 5月25日追施尿素 $0.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N : $354.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。玉米收获后, 在7月23日将秸秆还田并进行翻耕。花菜在8月20日进行移栽, 移栽前施有机肥 $14.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N : $67.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_2O_5 : $37.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 并分别在9月2日和10月11日追施尿素, 施用量均为 $0.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N : $177.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。花菜在2020年12月23日完全收获。

在2020年6—11月对监测点农田降雨事件进行长期监测。鉴于农田面积较大, 降雨产生的径流可能从多个排水口排出, 无法完全实现对农田径流的监测, 因此在农田内建立径流小区。径流监测样方面积为 0.1665 hm^2 , 为防止小区与外部农田发生串水或侧漏, 设高25 cm的水泥田埂, 用SBS防水卷材包裹, 卷材埋入地下20 cm, 地上10 cm。监测样方内有12条畦沟, 田块之间保持正常耕作, 在唯一排水口处布设径流监测设备。

1.2 研究方法

1.2.1 监测方法

(1) 降雨量

在农田边缘附近上空无遮挡处安装6465 M自清式雨水采集器(Davis, 美国)记录每5 min的降雨量

(mm), 雨量计数据传送到数据库。

(2) 农田径流量

设计了适用于旱地的农田径流监测装置^[20](图2), 该监测装置包括一个槽体, 槽体前端侧壁上设有进水口, 槽体后端下部设有出水口; 槽体内由前到后依次设有沉砂池、稳流板、三角堰。径流通过三角堰后排入农沟, 为便于农田水通过该农田径流监测装置排出, 设置堰口最低点与农田排水口持平。出水口通常呈封闭状态, 在降雨事件结束后打开以排出堰口底部积水。

为了提高径流测量精度, 采用浮子式液位计进行液位测量。浮子式液位计由6541 C浮子式水位传感器(Unidata, 澳大利亚, 分辨率=1 mm)和与其连接的水位检测仪组成, 安装在图2槽体一侧的测井内, 槽体后方侧壁上有一直径约为5 cm的开孔, 槽体内的水通过开孔进入浮子式传感器, 传感器内水面与槽体内水位持平, 当槽体内液位上升时, 测井内液位也上升, 浮子式水位传感器中的浮球也相应变化, 通过测量浮球的高度来确定槽体内水头高度。通过水位监测仪将数据每5 min一次传输到相连的自动采样设备的数据采集与计算模块来计算径流量。

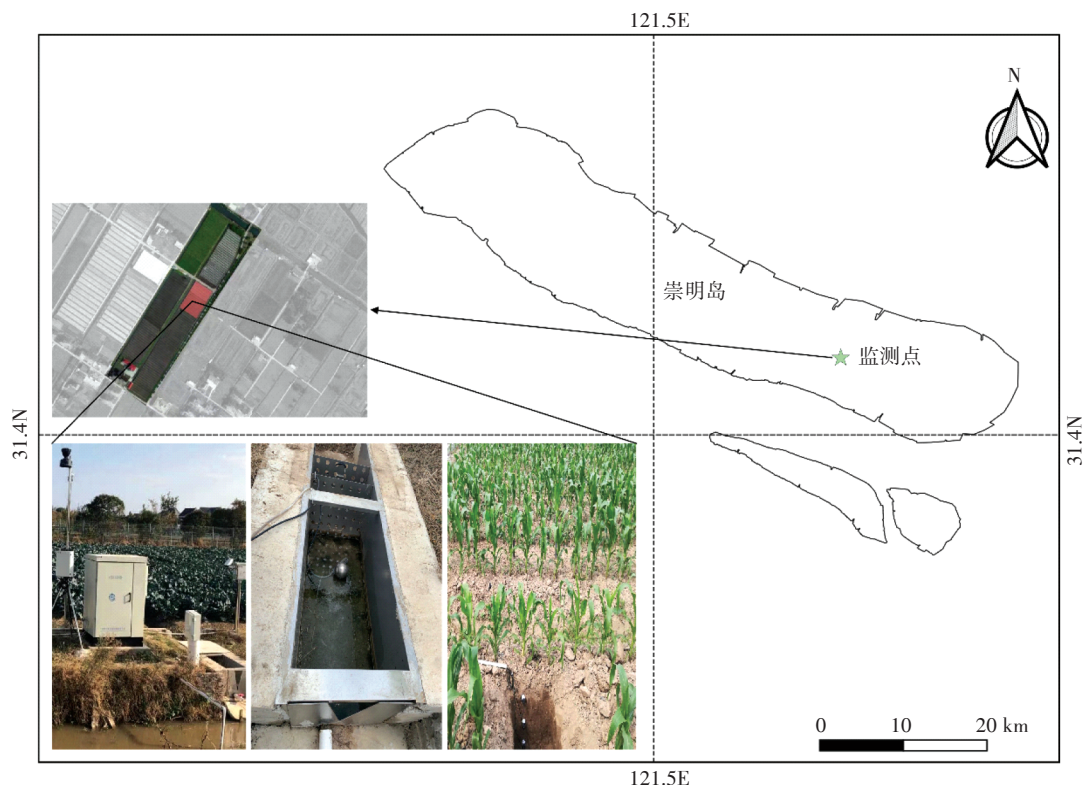


图1 研究区位置及农田监测点示意图

Figure 1 Schematic diagram of research area location and farmland monitoring points

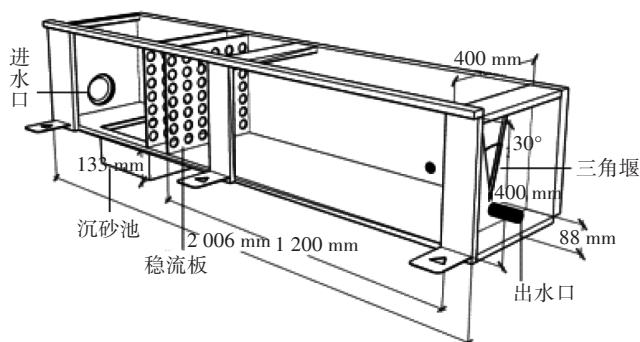


图2 薄壁三角堰结构图

Figure 2 Structural drawing of thin wall triangular weir

径流量根据《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL 537—2011)薄壁堰测流公式(1)计算:

$$Q = C_d \frac{8}{15} \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh_e}^{5/2} \quad (1)$$

式中: Q 为三角堰测量流体的流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; C_d 为径流系数; θ 为堰板顶角, $(^\circ)$; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; h_e 为三角堰的有效水头, m 。计算方法如下:

$$h_e = h + K_h \quad (2)$$

式中: h 为水头, m ; K_h 为考虑黏滞力和表面张力综合影响的校正值。 C_d 和 K_h 值参照《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL 537—2011)。

(3) 电导率

电导率测量不确定性较低,具有较高的时间分辨率和较低的操作成本,能够反映离子浓度。使用三角堰中垂直安装的 ponselC4E 电导率传感器(Aqualabo, 法国)进行测量,为了降低温度变化引起的测量误差,对电导率读数进行温度补偿、校正。当径流水位超过堰口最低点时,传感器被完全淹没并开始记录电导率,测量频率为每 5 min 一次。

(4) 土壤含水率(AMC)

分别在 10 cm(耕作层)、30 cm(犁底层)和 50 cm(心土层)埋设 Hydra Probe LITE 土壤水分传感器(Steven, 美国),测量不同土壤深度含水率,分析其对农田径流产生过程的影响,由于土壤水分相对于径流水位变化较慢,测量频率为每 10 min 一次,在降雨和非降雨期间均按测量频率进行测量。

(5) 数据采集

田间采集数据通过 CR300 数据采集器(Campbell, 美国)收集并传输到云数据库。

1.2.2 取样方法

农田径流通过自动采样器取样,自动采样程序由三角堰内水位触发。当三角堰内水位比堰口最低点

高 3 mm 时触发取样,按照预设的采样条件采集瞬时径流水样,径流产生 2 h 内,每隔 20 min 取样一次,后期取样时间间隔逐渐增加,每瓶采集 800 mL,共采集 24 个过程样。自动采样器中温度设置为 4 $^\circ\text{C}$,取样结束后将水样转移至聚乙烯瓶中低温保存,48 h 内完成分析。

1.3 样品分析与测定

水质测定指标包括 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、溶解性总磷(DTP)和电导率(EC)。采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定 TN 的含量(HJ 636—2012);采用酚二磺酸分光光度法测定 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量(GB 7480—1987);采用纳氏试剂分光光度法测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量(HJ 535—2009)。TP 和 DTP 采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893—1989);EC 采用《水和废水监测分析方法》(第四版增补版)中的实验室电导率仪法测定。其中, TN 和 TP 用摇匀后的水样直接测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DTP 的测定需将水样经 0.45 μm 水系膜过滤;EC 的测定需将水样中的粗大悬浮物质通过过滤或萃取除去。

1.3.1 径流曲线数

SCS 法将产流事件中各种环境因素的影响和贡献归结为一个空间参量,即径流曲线数(Curve number, CN)^[21]:

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (3)$$

式中: S 为农田土壤最大储水量, mm 。

CN 值用来评估土壤水分情况与径流之间的关系,取值范围为 0~100。CN 趋近于 0,表明土壤具有完全意义上的渗透性,无径流产生;CN 趋近于 100,表明土壤无渗透性,降雨全部转化为径流。

SCS 法认为降雨前期损失量(I_a)与农田土壤最大储水量(S)呈一定的正比关系,美国水土保持局提出最合适的比例系数为 0.2,即:

$$I_a = 0.2S \quad (4)$$

此方法中降雨量与径流量的关系为:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

式中: Q 为径流深度, mm ; P 为降雨深度, mm 。

贺宝根等^[22]的研究表明适合上海郊区的降雨前期损失量(I_a)与农田土壤最大储水量(S)的比例系数为 0.05,即将公式(4)、公式(5)修改为:

$$I_a = 0.05S \quad (6)$$

$$Q = \frac{(P - 0.05S)^2}{P + 0.95S} \quad (7)$$

1.3.2 次降雨事件平均浓度

降雨的随机性使得降雨径流中污染物浓度也具有较大的随机性^[23],因此用事件平均浓度(Event mean concentration, *EMC*)来描述,*EMC*可定义为污染物总负荷除以总径流量,见公式(8)。

$$EMC = M/V = \frac{\int_0^T c_i q_i dt}{\int_0^T q_i dt} \quad (8)$$

式中:*M*为整个降雨事件中污染物的总质量,g;*V*为整个降雨事件中产生的径流总量,m³; *c_i*为*t*时刻污染物浓度,mg·L⁻¹; *q_i*为*t*时刻径流流量,m³·min⁻¹; *T*为单次降雨事件结束时间。

1.3.3 统计分析

采用 SPSS 25.0 软件对数据进行处理和分析 (Pearson 相关性分析、最小二乘法拟合、多项式拟合),采用 Origin 2018 软件对数据进行作图,采用 Arc-GIS 10.1 进行研究区地图的绘制。

2 结果与讨论

2.1 降雨产流特征分析

2.1.1 农田降雨径流总体特征

监测期间共监测到 56 场降雨,监测农田总降雨量为 758.6 mm (表 1),降雨主要集中在 6、7 月和 8、9 月中旬,其余时期降雨相对较少,日降雨量峰值出现在 6 月 3 日,达到 64.4 mm (图 3)。农田总产流 333.1 m³ (200.1 mm),最大日径流量出现在 7 月 6 日,达 96.1 m³ (57.7 mm) (图 3),径流输出主要分布在 6、7 月份,径流量分别为 90.4 m³ 和 141.3 m³,占监测期间总径流量的 69.6%,后期随降雨量的减少径流量逐渐减少。日径流量和降雨量显著相关($y=0.9318x-9.8964$, $r=0.724$,

表 1 监测期间各月份降雨产流情况

Table 1 Rainfall runoff in each month

月份 Month	降雨次数 Number of rainfall	产流次数 Number of runoff	降雨量 Rainfall /mm	径流量 Runoff/ m ³ /mm
6	13	8	250.4	90.4/54.3
7	15	4	170.6	141.3/84.9
8	6	4	128.2	30.8/18.5
9	9	3	110.4	44.4/26.7
10	6	1	44.4	10.0/6.0
11	7	2	54.4	16.4/9.8
总计	56	22	758.6	333.1/200.1

$P<0.01$),且相同降雨条件下,径流产生情况有显著差异,这是由于径流的生成不仅受降雨的影响,还受前期土壤水分条件的影响^[24]。

2.1.2 次降雨事件降雨产流特征及与土壤湿度关系

AMC 与田间持水量密切相关,是影响降雨产流的重要因素。观测期间共记录 16 场产流, *CN* 值范围为 37~88。AMC₁₀ 和 AMC₃₀ 与 *CN* 值之间有极显著的线性相关关系 ($r=0.889$ 和 $r=0.863$, $P<0.01$) (图 4),线性拟合方程 R^2 值分别为 0.790 5 和 0.744 8 ($P<0.01$),但 AMC₅₀ 与 *CN* 值无显著的相关性 ($P>0.05$)。

在监测期间各月份,分别选取 1 场降雨量、降雨历时及前期 AMC 差异较大的降雨事件 (10 月份仅一场产流降雨,且各指标与 11 月份选取降雨相似,故由 6 月份降雨替代),标记为降雨事件 0603、0628、0705、0805、0917、1125。次降雨条件下降雨-产流关系及土壤湿度变化见图 5。降雨初始,土壤未饱和,土壤入渗率等于降雨强度,因此无径流产生^[25];随着降雨的持续,AMC 达到饱和状态,降雨强度大于入渗速

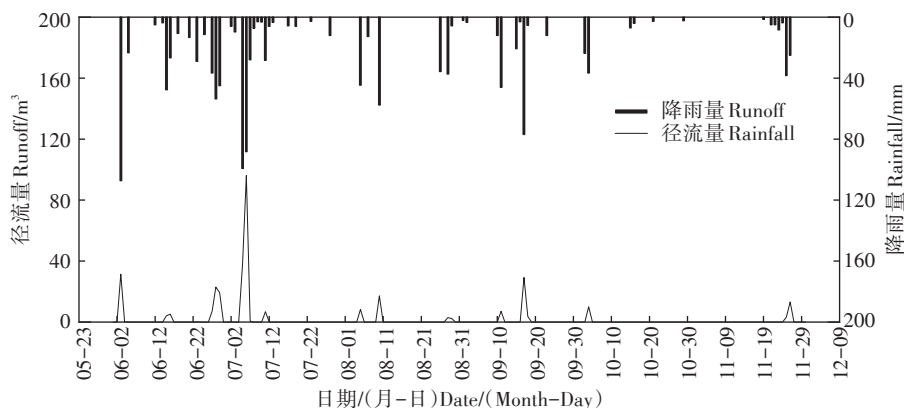


图 3 6—11 月农田降雨量和径流量

Figure 3 Dynamics of rainfall and runoff from June to November

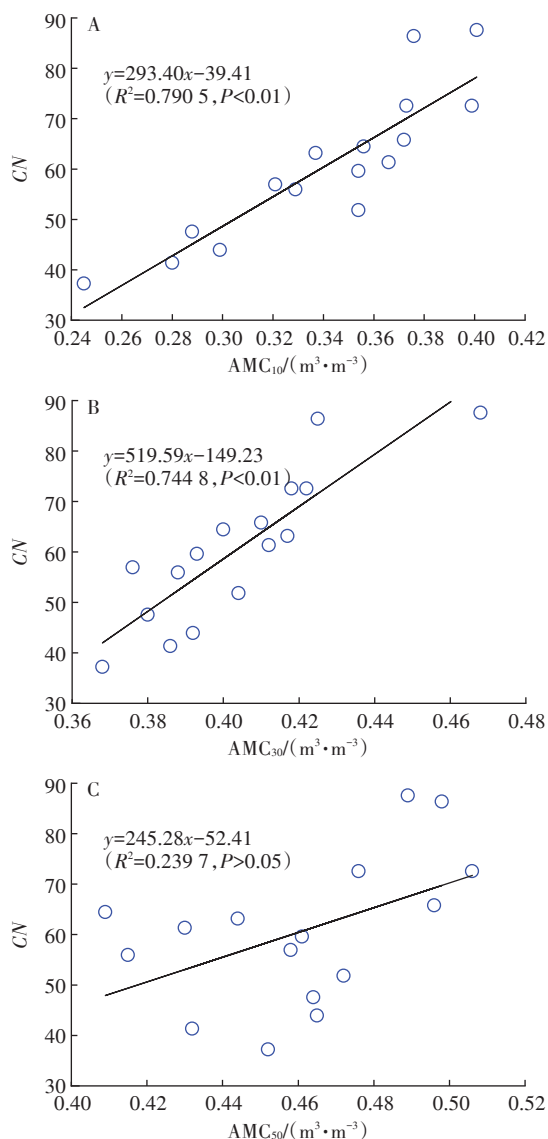


图4 各土层前期土壤含水率与CN值的关系($n=16$)

Figure 4 Relationship between soil water content and CN value in early stage of each soil layer

度,开始产生径流,这与薛鹏程等^[26]研究结论类似。由于产流后的土壤含水率处于饱和状态,土壤下渗速度趋于稳定,径流量与降雨量的变化一致,呈现明显的峰谷变化特征。降雨事件0603、0805的径流曲线为单峰形态,其余4场为多峰形态。随着降雨量的逐渐减少,径流进入退水过程。降雨事件0603、0805在降雨停止后仍继续产流,且产流量随时间逐渐减少,而多峰形态降雨场次中,若退水过程后伴随降雨量的升高,则农田能够快速产流。径流量峰值滞后于降雨量峰值,这与张展羽等^[27]研究结论类似,这可能是由于土壤的下渗作用,以及径流小区面积较大,需要一定汇流时间。

降雨事件0603、0705、0805中AMC₁₀、AMC₃₀、AMC₅₀在产流过程中均由不饱和状态达到饱和状态;降雨事件0917、1125中AMC₅₀以及降雨事件0628中AMC₃₀、AMC₅₀在降雨前已经处于饱和状态,因此降雨后无明显变化。这主要是由于降雨间隔比较短,一定时间内30 cm与50 cm处土壤没有蒸发损失,仍然保持饱和状态,因此无法反映田间持水能力。崇明岛处长江下游,属于河网平原地区,具有降雨丰沛、地下水位浅等特点,深层土壤水分长期处于饱和状态,降雨对50 cm处土壤含水率没有影响,这也能解释CN与AMC₅₀没有显著相关关系的现象(图4)。研究表明,AMC₁₀更适宜作为反映土壤持水能力的指标。

产流前降雨总量与CN值有良好的多项式关系($R^2=0.9995$),能够反映田间持水情况(图6)。产流前土壤含水率较低,土壤入渗能力较大,降雨能完全渗入到土壤当中;当土壤水分饱和后,土壤入渗能力趋于平稳,入渗速率较低^[28]。可见,土壤下渗量主要集中在产流前期,产流前降雨总量基本能反映土壤持水能力,可以通过记录产流前的总降雨量来确定农田的持水量,这为CN值的估算提供了更为简易的方法。

2.2 径流中养分特征分析

2.2.1 养分EMC变化特征

径流TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的EMC平均值分别为27.42、0.55、22.55 mg·L⁻¹(表2),TP、DTP的EMC平均值为0.41、0.36 mg·L⁻¹,各养分EMC变异系数均大于90%,较高变异系数表明各养分EMC在不同的降雨径流事件中差异较大,其中NH₄⁺-N变异系数最高,浓度最大值约为最小值的59倍,而NO₃⁻-N中最大值与最小值的比值达到了332,这是由于农田施肥对N浓度产生了影响,使得N浓度大幅度提高。在养分随径流输出的过程中,TN的组成成分和浓度随降雨事件的变化而变化,NO₃⁻-N是N径流流失的主要形态,占TN的77.42%~94.55%。

TN、NO₃⁻-N的EMC与距施肥天数呈显著负相关($r=-0.686, P<0.05$ 和 $r=-0.717, P<0.05$),NH₄⁺-N则无明显的相关性。P的输出较为稳定,没有表现出逐步降低的趋势。图7显示,TN和NO₃⁻-N的EMC在监测期间呈现出先降低后升高的趋势,这是由于6月3日为追施尿素后的第一场雨,因此N浓度均为最高值,随着距施肥天数的增加,TN和NO₃⁻-N浓度逐渐降低,9月2日再次施肥后(尿素),EMC上升,而11月份浓度的升高则与10月11日追施尿素有关。NH₄⁺-N的EMC在6月3日达到了4.7 mg·L⁻¹,其余降雨事件浓度

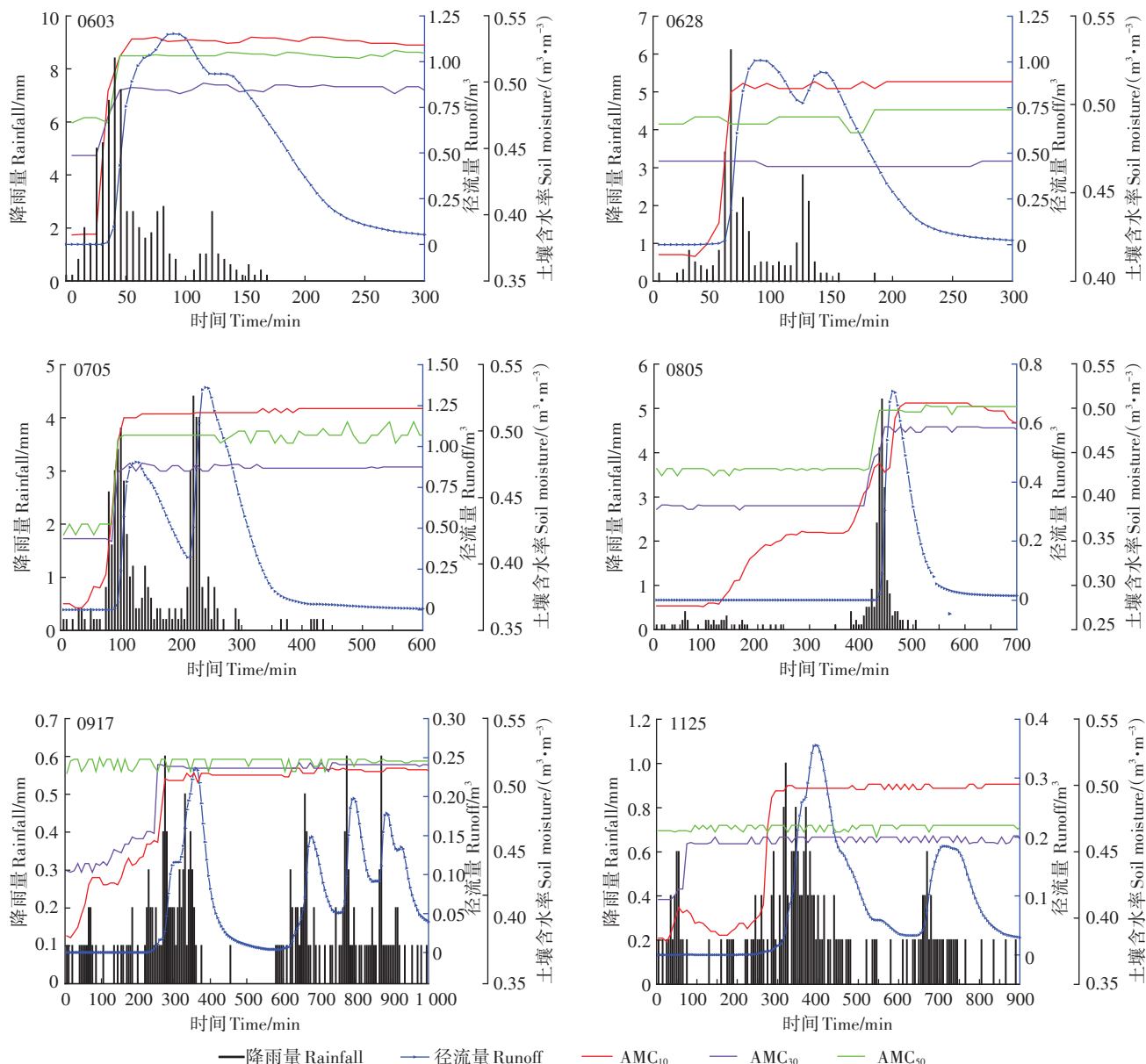


图5 降雨径流及土壤含水率变化特征

Figure 5 Variation characteristics of rainfall runoff and soil moisture

均未超过 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。大部分降雨事件中TP和DTP浓度变化较为平缓,均在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上下波动,而8月份TP和DTP浓度显著升高,这可能与7月23日玉米秸秆还田后进行翻耕有关^[29]。由于土壤对P有较强的吸附固定作用^[30],翻耕使得土壤抗冲性变差,导致径流中携带的泥沙含量升高;而部分玉米秸秆通过翻耕进入土壤中并逐渐分解,补充了土壤中N、P的含量,但由于秸秆在被微生物分解过程中需要消耗土壤中的N,因此N浓度并没有升高,而P浓度大幅度升高。

2.2.2 次降雨事件养分浓度分析

选取3场取样次数较多(≥ 8)的降雨事件进行养

分输出过程分析(分别标记为降雨事件0629、0805、0917),根据24 h降雨量等级划分标准^[31],3场次降雨事件均为大雨。N浓度在径流初始时相对较高,随着径流速度的增加,浓度呈下降的趋势(图8),这可能是由于降雨初期降水的侵蚀作用导致N浓度较高,随着降雨的进行,侵蚀作用和稀释作用交互发生,且稀释作用占据主导地位^[32]。而在径流退水阶段,由于稀释作用减弱,N浓度呈现不同程度的上升,这与李瑞玲等^[33]的研究结果类似。N浓度与径流速度均呈现出显著的负相关($P < 0.01$)。且N浓度的谷值出现的时间早于径流峰值,这与严坤等^[34]在柑橘园种植地的

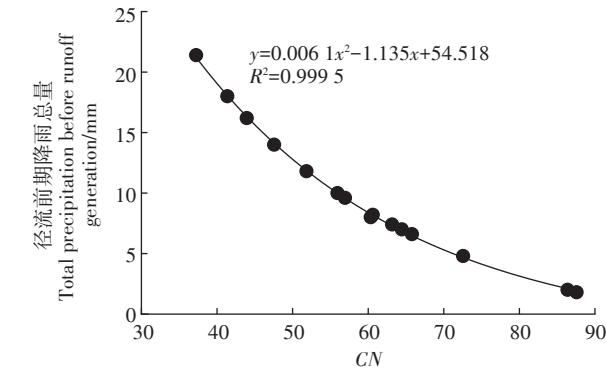


图6 CN值与产流前累计降雨量关系

Figure 6 Relationship between CN and total precipitation before runoff generation

表2 不同降雨事件中农田径流事件平均浓度(EMC)

Table 2 Event mean concentration(EMC) of farmland runoff under different rainfall events					
统计量Statistic	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	DTP
最小值Minimum/(mg·L ⁻¹)	2.19	0.08	0.25	0.08	0.03
最大值Maximum/(mg·L ⁻¹)	100.16	4.75	83.06	1.35	1.31
平均值Mean/(mg·L ⁻¹)	27.42	0.55	22.55	0.41	0.36
标准偏差Standard deviation/(mg·L ⁻¹)	31.42	1.32	26.27	0.40	0.38
变异系数Coefficient of variation/%	114.58	239.72	116.51	98.12	105.22

研究结果类似。而P浓度变化则与径流速度呈现出显著的正相关($P<0.01$),3场降雨事件中P浓度的峰值出现时间相对于径流量峰值并不一致,这与严坤等^[34]各形态P浓度峰值略晚于径流峰值的研究结果有所差异。

3场降雨中TN、NO₃⁻-N与EC均呈显著的正相关($P<0.01$)(表3)。溶液EC主要受含盐量影响^[35],农田径流类似混合盐类溶液,当TN含量增加时,盐浓度也随之增加,王伟等^[36]的研究表明,在同一类型水体中,EC伴随着盐浓度的升高而升高,表明TN、NO₃⁻-N与

EC呈显著相关,是影响EC的主导因素。但NH₄⁺-N与EC无显著的相关性,这可能是由于NH₄⁺-N浓度较低,对EC影响较小。而降雨事件0629、0805中TP、DTP与EC呈显著的负相关($P<0.01$)(表3),这可能是由于P浓度对EC影响较小,并且P的输出与N输出不同,在径流速度增加的同时,降雨冲刷导致地表径流当中P的浓度也增加,因此P浓度没有被降雨稀释而降低(图8)。

图9是降雨事件0629、0805、0917的EC在农田径流排放过程中的变化情况。EC与径流速度呈显著负相关,这是由于低EC的降水与径流的混合从而产生了稀释作用,通过EC的变化能够反映降雨对N的稀释作用,但较大的降雨冲刷能够促进土壤当中P的释放,这导致了径流速度较大、EC较低时,P的浓度较高,因此EC与P浓度呈负相关。

2.2.3 次降雨事件养分输出负荷分析

3场降雨事件中,径流量大小表现为0917>0629>0805(表4)。其中,降雨事件0917的TN、NO₃⁻-N浓度均大于降雨事件0629、0805,而降雨事件0917的NH₄⁺-N、TP、DTP浓度小于降雨事件0805,因此3场降雨事件中径流流量和各养分浓度差异导致各养分输出负荷的不同。降雨事件0917的TN、NO₃⁻-N输出负荷均远大于降雨事件0629、0805,而降雨事件0805的NH₄⁺-N、TP、DTP输出负荷却呈现相反变化。因此,浓度差异对NH₄⁺-N、TP、DTP输出负荷的影响要大于径流流量对其的影响。

表4 各养分的输出负荷
Table 4 Output load of each nutrient

降雨事件 Rainfall event	径流量Runoff/ (m ³ ·hm ⁻²)	负荷Load/(g·hm ⁻²)				
		TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	DTP
0629	116.5	978.3	903.7	12.0	27.0	23.5
0805	49.8	159.1	68.5	34.8	67.3	65.5
0917	179.0	8 512.9	6 591.0	33.6	64.3	60.1
22场总降雨	2 000.6	40 789.8	33 243.2	1 045.0	467.9	430.6

表3 不同降雨事件的电导率与养分浓度、径流速度之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between conductivity, nutrient concentration and runoff velocity under different rainfall events							
降雨事件 Rainfall event	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	DTP/ (mg·L ⁻¹)	径流速度 Runoff velocity/(m ³ ·5 min ⁻¹)	样本容量 Sample size
0629	0.909**	0.583	0.914**	-0.777**	-0.750**	-0.706*	11
0805	0.931**	0.556	0.825**	-0.875**	-0.789**	-0.903**	10
0917	0.951**	0.536	0.933**	-0.498	-0.023	-0.347**	8

注:*表示 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Notes:*Correlation is significant at $P<0.05$,** Correlation is significant at $P<0.01$.

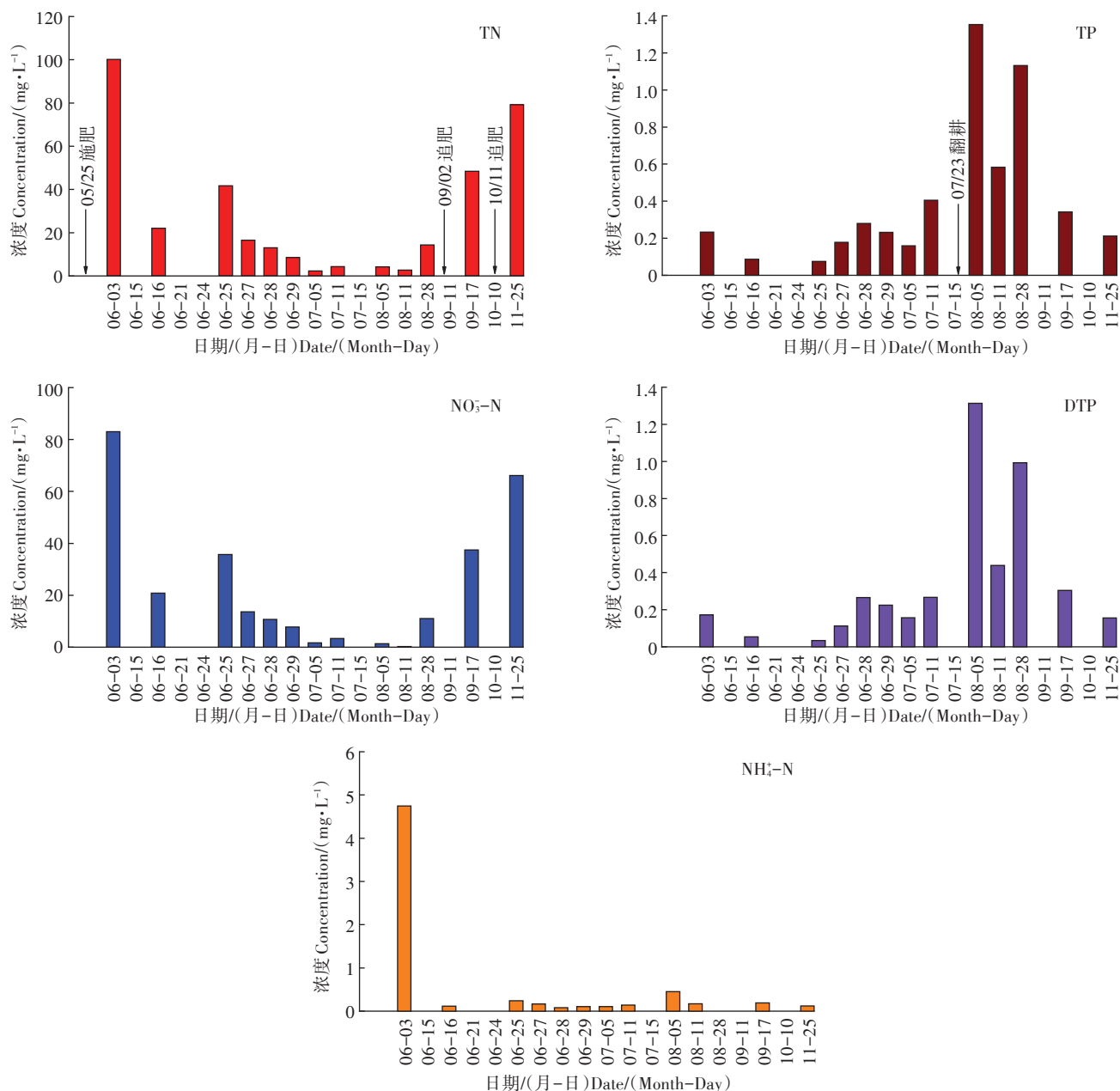


图7 监测期间养分事件平均浓度变化特征

Figure 7 Variation characteristics of event mean concentration of nutrient during monitoring

根据22场总降雨的监测数据, $\text{NO}_3\text{-N}$ 输出负荷占TN的81.50%,DTP输出负荷占TP的92.03%,可见N主要以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的形式输出,P主要以DTP的形式输出。3场降雨事件中,降雨事件0629、0917的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 输出负荷占TN的92.37%和77.42%,降雨事件0805占比为43.05%,表明在3场降雨中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 是农田N输出的主要形式。而P输出较少,降雨事件0629、0805、0917的DTP输出负荷分别占TP的87.04%、97.33%、93.47%,表明P主要以溶解态的形式输出。

3 结论

(1)本研究中,CN值与 AMC_{10} 、 AMC_{30} 存在良好的相关关系($r=0.889$ 和 $r=0.863$, $P<0.01$),与 AMC_{50} 无显著的相关性,且CN值与径流产生前总降雨量有良好的多项式关系($y=0.0061x^2-1.135x+54.518$, $R^2=0.9995$),田间入渗量可能主要集中在产流前。

(2)TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的事件平均浓度(EMC)主要受到距施肥天数的影响,而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 受到平均雨强的影响;P

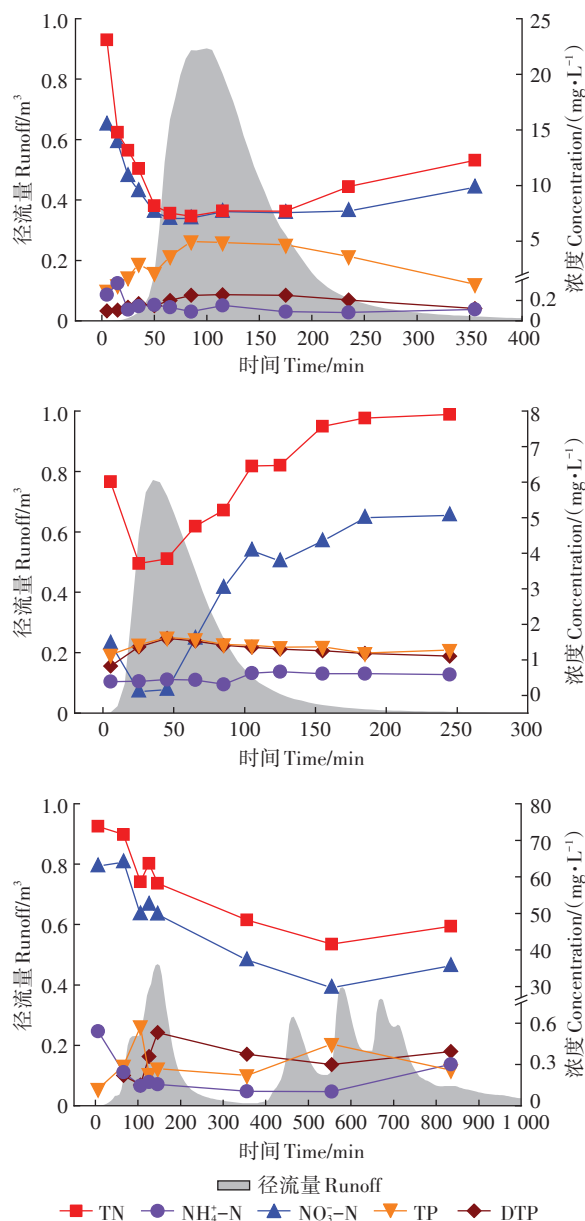


图8 单场降雨中各养分浓度变化过程

Figure 8 Dynamics of nutrient concentrations under rainfall

的 EMC 变化较为平缓,但在8月份由于秸秆还田后进行翻耕导致 EMC 大幅升高,因此旱地轮作模式下需要注意秸秆还田、翻耕等因素对面源污染输出的影响。

(3)在次降雨事件中, N 浓度随径流速度的升高而降低, P 浓度与径流速度的变化总体趋势一致。电导率与径流速度呈现出完全相反的变化趋势,降雨对农田径流中 N 有一定的稀释作用。

(4)在次降雨事件中,浓度差异对 NH_4^+-N 、 TP 、 DTP 输出负荷的影响要大于径流流量对其的影响; NO_3^-N 是旱地农田 N 输出的主要形式,而 P 主要以溶解态的形式进行输出。

参考文献:

- [1] HOU X, ZHOU F, LEIP A, et al. Spatial patterns of nitrogen runoff from Chinese paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 231:246–254.
- [2] OENEMA O, ROEST C W J. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters: The effects of policies and measures in the Netherlands[J]. *Water Science & Technology*, 1998, 37(3):19–30.
- [3] ZHU Q D, SUN J H, HUA G F, et al. Runoff characteristics and non-point source pollution analysis in the Taihu Lake Basin: A case study of the town of Xueyan, China[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(19):15029.
- [4] LIU R, WANG J, SHI J, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469(15):1069–1077.
- [5] WANG J, LÜ G, GUO X, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1):93–106.
- [6] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18):8–10. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18):8–10.
- [7] GONG Y W, SHEN Z Y, HONG Q. Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling using the GLUE methodology[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4):246–255.
- [8] HUANG J, XU C C, RIDOUTT B G, et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159(15):171–179.
- [9] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20):6664–6676. ZHANG Y T, LIU H B, WANG H Y, et al. A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20):6664–6676.
- [10] 马广文, 王业耀, 香宝, 等. 松花江流域非点源氮磷负荷及其差异特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14):163–169. MA G W, WANG Y Y, XIANG B, et al. Diversity characteristic and pollution load of non-point source total nitrogen and total phosphorus in Songhua River Basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(14):163–169.
- [11] LI J, MA M, LI Y, et al. Influence analysis of different design conditions on urban runoff and nonpoint source pollution[J]. *Water Environment Research*, 2019, 91(11):1546–1557.
- [12] RIXON S, LEVISON J, BINNS A, et al. Spatiotemporal variations of nitrogen and phosphorus in a clay plain hydrological system in the Great Lakes Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714:136328.1–136328.12.
- [13] WELTER J R, FISHER S G. The influence of storm characteristics on hydrological connectivity in intermittent channel networks: Implications for nitrogen transport and denitrification[J]. *Freshwater Biology*,

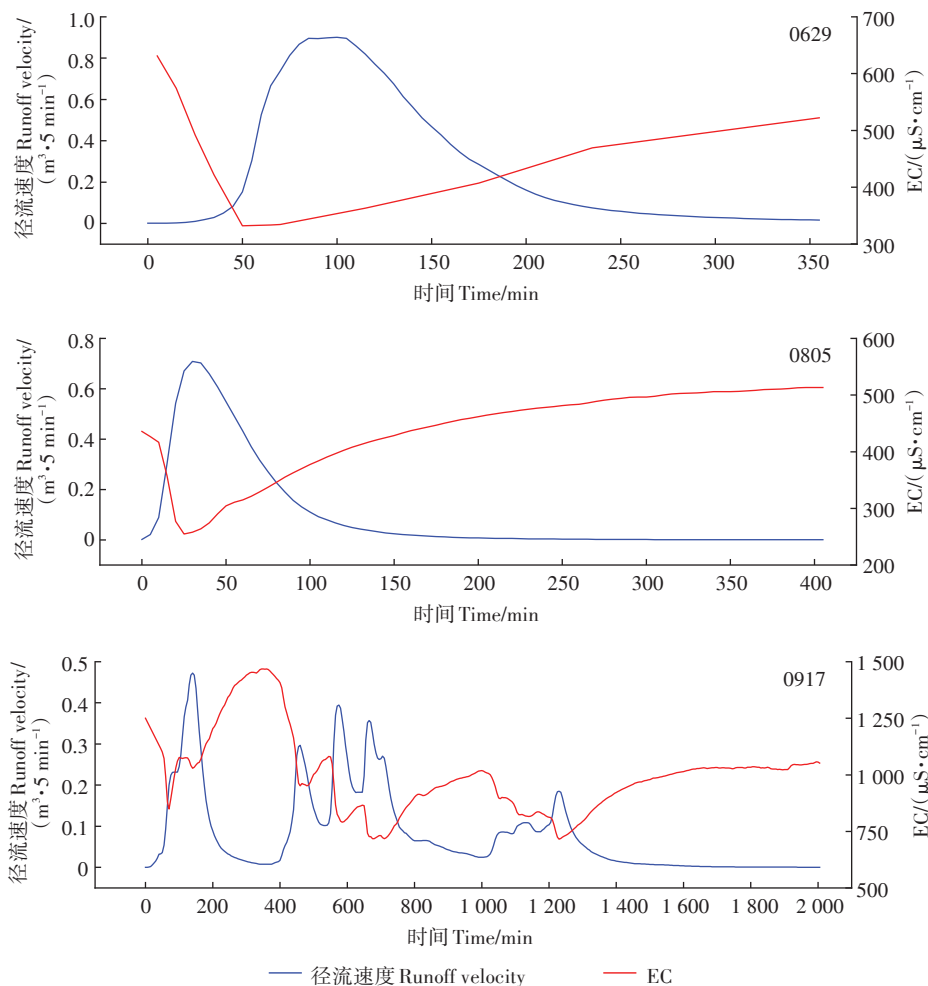


图9 电导率与径流速度关系

Figure 9 Relationship between conductivity and runoff velocity

2016, 61(8):1214–1227.

- [14] YUAN Z, LIAO Y, ZHENG M, et al. Relationships of nitrogen losses, phosphorus losses, and sediment under simulated rainfall conditions [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2020, 75(2): 231–241.
- [15] 王月, 房云清, 纪婧, 等. 不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律 [J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 814–821. WANG Y, FANG Y Q, JI J, et al. The loss of nitrogen and phosphorus from dry-land farmland under different rainfall intensities[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 814–821.
- [16] 中华人民共和国国土资源部. 2016中国国土资源公报[J]. 国土资源通讯, 2017(8): 24–30. Ministry of Land and Resources of China. China land and resources bulletin 2016[J]. *National Land & Resources Information*, 2017(8): 24–30.
- [17] 关荣浩, 马保国, 黄志伟, 等. 冀南地区农田氮磷流失模拟降雨试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 581–589. GUAN R H, MA B G, HUANG Z X, et al. Experimental study of simulated rainfall on nitrogen and phosphorus loss from farmland in Southern Hebei Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 581–589.

- [18] 王永尚. 自然降雨条件下南方湿润平原农田氮磷流失初探[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(11): 2226–2227, 2229. WANG Y S. Preliminary study on the loss of nitrogen and phosphorus from farmland in Southern Humid Plains under natural rainfall[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(11): 2226–2227, 2229.
- [19] 向速林, 王逢武, 聂发辉. 赣江下游典型蔬菜地地表径流的氮磷流失特征[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 111–115. XIANG S L, WANG F W, NIE F H. Nitrogen and phosphorus losses characteristics of surface runoff in typical vegetable field of Ganjiang River estuary area[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(2): 111–115.
- [20] 张敏, 李金文, 钱晓雍, 等. 一种适用于水田和旱地的农田径流监测装置: CN111983187A[P]. 2020–11–24. ZHANG M, LI J W, QIAN X Y, et al. Farmland runoff monitoring device suitable for paddy field and dry land: CN111983187A[P]. 2020–11–24.
- [21] MISHRA S K, TYAGI J V, SINGH V P, et al. SCS-CN-based modeling of sediment yield[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/2/3/4): 301–322.
- [22] 贺宝根, 周乃晟, 高效江, 等. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系——SCS法的修正[J]. 环境科学研究, 2001(3): 49–51. HE

- B G, ZHOU N S, GAO X J, et al. Precipitation-runoff relationship in farm land nonpoint source pollution research: Amending coefficient of SCS hydrologic method[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001 (3): 49-51.
- [23] 汪楚乔, 陈柔君, 吴磊, 等. 宜兴典型村落不同下垫面降雨径流污染物排放特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 632-638. WANG C Q, CHEN R J, WU L, et al. Release of pollutants with rainfall-triggered runoff from different underlying surfaces in villages typical of Yixing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4): 632-638.
- [24] BOULDIN J L, FARRIS J L, MOORE M T, et al. Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the Mississippi Delta landscapes[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(3): 403-411.
- [25] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1763-1769. YANG L X, YANG G S, YUAN S F, et al. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1763-1769.
- [26] 薛鹏程, 庞燕, 项颂, 等. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1362-1368. XUE P C, PANG Y, XIANG S, et al. Nitrogen loss characteristics of farmland runoff under simulated precipitation conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1362-1368.
- [27] 张展羽, 袁自瑛, 孔莉莉, 等. 不同毛沟布置方式下农田次降雨氮素流失特性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 51-55. ZHANG Z Y, YUAN Z Y, KONG L L, et al. Characteristics of nitrogen loss from field ditches with different densities under single rainfall event [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 51-55.
- [28] 姚宝林, 李光永, 李发永. 南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4453-4462. YAO B L, LI G Y, LI F Y. Soil infiltration characteristics in fallow period of drip irrigation cotton fields in South Xinjiang[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4453-4462.
- [29] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕影响坡地磷流失试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 443-448. LI Y Y, SHAO M A. Effect of soil tillage on phosphorus loss from slope land: An experimental study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 443-448.
- [30] 唐雪霞, 杨浩, 盛建东, 等. 不同施磷处理下棉田土壤磷素吸持特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 8-16. TANG X X, YANG H, SHENG J D, et al. Study on the characteristics of phosphorus sorption in cotton field under different phosphorus application treatments [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 8-16.
- [31] 中国气象局. 降水的等级划分[EB/OL]. <http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/201209281111/2010052703/201212/t20121212195616.html>. China Meteorological Administration. Grading of precipitation[EB/OL]. <http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/201209281111/2010052703/201212/t20121212195616.html>.
- [32] 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5047-5055. LIAN H S, LIU H B, LI X D, et al. Characteristics of nitrogen variation and its response to rainfall: A case study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5047-5055.
- [33] 李瑞玲, 张永春, 曾远, 等. 太湖流域丘陵地区暴雨条件下农田氮素随地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1185-1190. LI R L, ZHANG Y C, ZENG Y, et al. Effects of rainstorm on the export of farmland nitrogen with surface runoff in Hilly Area of Tai Lake Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1185-1190.
- [34] 严坤, 王玉宽, 刘勤, 等. 三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3646-3656. YAN K, WANG Y K, LIU Q, et al. Dynamic process of nitrogen and phosphorus export and loss load in an intensive orchard with ridge and furrow plantation in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3646-3656.
- [35] 王瑞, 代丹, 张弛, 等. 太湖不同介质电导率时空变化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4469-4477. WANG R, DAI D, ZHANG C, et al. Temporal and spatial variations in the conductivity in different media in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4469-4477.
- [36] 王伟, 鲁中霞. 水中全盐量的电导法测定[J]. 中国环境监测, 1996, 12(5): 26-27. WANG W, LU Z X. Determination for salt in water by conductivity[J]. *Environmental Monitoring in China*, 1996, 12(5): 26-27.