

平原河网地区典型旱地面源污染排放系数 时间变化特征及影响因素研究

端木家耀^{1,2}, 陈诚², 陈小华², 沈根祥^{1,2*}, 张敏²,
郭春霞², 王振旗², 白玉杰², 凌志雄^{1,2}, 曹国民^{1*}

(1.华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 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:【目的】探明平原河网地区典型旱地离田排放系数的变化特征, 为农业面源污染监测管理提供参考。【方法】以上海市崇明岛某典型旱地为研究对象, 通过构建水文-水质协同监测系统, 对旱地面源污染排放系数进行测算, 明确排放系数的时间变化特征, 分析排放系数的影响因素。【结果】日尺度下, 氮、磷的离田排放系数变化范围分别为 2.2~9 843.9、0.08~667.0 g/(hm²·d); 月尺度下, 氮、磷离田排放系数变化范围分别为 0.02~17.2、0.001~1.04 kg/(hm²·m)。在降水产流事件中, 氮离田排放系数与降水历时呈极显著正相关, 磷离田排放系数与产流事件的总降水量、平均降水强度、最大小时降水强度极显著正相关。施肥后, 氮日排放系数迅速增大, 磷日排放系数无明显变化。各时间尺度下, 氮排放系数与地表径流不存在显著相关性, 磷排放系数与地表径流极显著正相关。【结论】氮、磷离田排放系数的日、月际变化幅度较大, 氮离田排放系数易受施肥措施影响, 磷离田排放系数则更易受降水和地表径流的影响。

关键词: 平原河网; 旱地; 面源污染; 协同监测; 排放系数

中图分类号: S276; X52

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023478

OSID: 

端木家耀, 陈诚, 陈小华, 等. 平原河网地区典型旱地面源污染排放系数时间变化特征及影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(3): 71-79.

DUANMU Jiayao, CHEN Cheng, CHEN Xiaohua, et al. Temporal variation in discharge coefficients of non-point source pollution and its determinants in river-network areas in a plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 71-79.

0 引言

【研究意义】随着点源污染防治逐步取得成效, 农业面源污染已成为平原河网地区河道水质恶化的重要原因^[1-3]。与点源污染相比, 农业面源污染由于其分散性、随机性和滞后性特征而难以控制^[4-5], 成为全球水污染治理领域的焦点, 离田排放系数的准确测算对于厘清农田面源污染物对水环境的影响具有重要意义。

【研究进展】上海地处长江入海口、太湖流域东缘, 属于典型的平原河网地区, 河网密布, 水力坡度平缓, 水动力严重不足, 水体自净能力较弱; 受潮汐效应影响, 水流往复回荡, 水文条件复杂^[6-7]。

长江经济带是我国重要的粮油、畜禽和水产品主产区, 复种指数高, 化肥、农药施用量高于全国平均水平^[8]。降水和灌溉是农业面源污染排放的主要驱动力和输移载体^[9-10]。在点源污染逐步得到控制的情况下, 加快推进农业面源污染治理已成为河道水质改善、水生态环境修复、推动农业绿色高质量发展的迫切需求。在降水或灌溉水等因素驱动作用下^[11], 农田氮、磷等污染物通过地表径流进入受纳水体, 对生态环境造成污染, 目前有关基于高频监测的氮、磷离田排放系数精准测算研究仍较为匮乏。目前已有较多研究通过模型计算入河排放负荷。Du等^[12]通过GWLF模型模拟流域月养分负荷, 结果表明总氮的主要来源是农村地表径流, 总磷来源于土壤侵蚀; 但Haith等^[13]发现该模型存在局限性, 导致月养分负荷峰值被低估了2%。Yuan等^[14]基于ABM-IECM模型发现, 旱地养分排放系数为12.5 kg/(hm²·a), 但忽略了降水时空分布不均的影响。Yu等^[15]基于EMC经验模型, 发现总氮预测值和观测值匹配度较高, 但悬浮固体和总磷存在较大差异。上述研究表明, 尽管模拟方法具有良好的精度, 但也存在一定

收稿日期: 2023-10-16 修回日期: 2023-12-18

基金项目: 上海市2021年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1202400); 上海市生态环境局工作专项(H2023090168); 上海市农业面源污染试点监测项目(SHZC20222679)

作者简介: 端木家耀(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: duanmujiayao@163.com

通信作者: 沈根祥(1965-), 男, 教授级高工, 博士, 主要从事环境健康与农村生态保护研究。E-mail: shengx@saes.sh.cn

曹国民(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事水污染控制理论与技术、细胞固定化技术及应用等研究。E-mail: gmcao@ecust.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

局限性^[16]，模型的精度取决于大量的参数，导致模型建立过程困难^[17-18]。【切入点】现有研究缺乏田间尺度的持续原位监测，缺少长时间序列下的离田排放系数变化过程。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究针对农田面源污染浓度变异性高、产生随机的特征，构建了基于径流驱动自动采样方法，构建以水文自动监测触发自动采样、水质高频自动采样和水文水质协同监测为核心的农田面源污染监测系统，旨在精准测算平原河网地区典型旱地的离田排放系数，为类似地区农业面源污染监测和监督管理提供可靠的科学依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海市崇明岛某蔬菜基地 (121°44'03"E, 31°32'53"N)，该地区农田土壤质地为粉砂土，年平均日照时间为 1 973.9 h，年平均气温为 18.1 °C，汛期降水集中，年平均降水量为 1 020.2 mm。为准确监测农田排水量，避免农田排水量从多个出水口排出，在田间建设径流小区，砌水泥田埂，高为 25 cm，以避免样田与外部农田发生侧渗，样田面积约为 1 667 m²，流量监测设备安装在仅有的一个汇水口处。研究区施肥情况见表 1。在 2020 年 9 月—2022 年 11 月对监测点样田排水开展水文水质协同监测。

表 1 监测区域施肥情况

Tab.1 Fertilization situation in the study area

施肥日期	肥料类型	施肥量/(kg·hm ⁻²)		
		肥料质量	以纯氮计	以纯磷计
20200902	尿素	380	177.5	-
20201011	尿素	380	177.5	-
20220912	复合肥+有机肥	750+1 490	172.1	55.3

1.2 研究方法

1) 流量和降水量监测

在农田排水口处安装三角堰槽，采用浮子式水位计自动记录水位数据并换算为流量 (m³/s)，监测间隔为 5 min。监测数据均通过 CR300 数据收集器 (Campbell, 美国) 收集并传输到云数据库。高频水文在线自动监测针对降水脉冲特征，可以充分捕捉汛期暴雨径流过程，并及时触发采样。使用 6465M 自清空式雨水采集器 (Davis, 美国) 监测降水量 (mm)，监测间隔为 5 min。

2) 水质采样

为保障水质样品的合理性和代表性，产流初期 (产流后 3 h 内) 基于 0.5 h 的采样间隔，产流中后期基于 2 h 的采样间隔进行水质自动采样。

3) 实验室精确分析

样品在水质自动采样器内的存储温度不超过 4 °C。采集的水样及时送至实验室，在 48 h 内完成样品分析。

1.3 样品分析方法

水质测定指标包括总氮、氨氮、硝态氮、总磷、溶解性总磷。总氮量采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定；总磷量和溶解性总磷量采用钼酸铵分光光度法测定；氨氮量采用纳氏试剂分光光度法测定；硝态氮量采用酚二磺酸分光光度法测定。

1.4 旱地面源污染排放系数计算方法

1.4.1 日尺度离田排放系数计算

排水口监测点位产流期间某个单一监测指标的农田地表径流面源污染负荷率计算如下：

$$R_i = c_i \cdot Q_i, \quad (1)$$

式中： R_i 为产流事件中排水口监测点位第 i 次采集的水样的农田地表径流面源污染负荷率 (单位时间内通过排水口的面源污染物负荷量) (g/s)； c_i 为产流事件中排水口监测点位第 i 次采集的水样的监测指标浓度 (mg/L)； Q_i 为产流事件中排水口监测点位第 i 次采集水样时对应的农田排水口流量 (m³/s)。

排水口监测点位产流期间某个单一监测指标的农田地表径流面源污染负荷计算式如下：

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(R_i + R_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2000}, \quad (2)$$

式中： L 为排水口监测点位产流期间产生的农田面源污染负荷量 (kg)； n 为上述产流事件中在排水口监测点位采集的水样次数； t_i 、 t_{i+1} 为产流事件中第 i 、 $i+1$ 次采集水样的时刻。

日尺度离田排放系数按下式计算：

$$DC_{\text{日}} = \frac{1000 \cdot L}{A \cdot T}, \quad (3)$$

式中： $DC_{\text{日}}$ 为日尺度离田排放系数 (g/(hm²·d))；

A 为样田面积 (hm²)； T 为时间 (d)。

1.4.2 月尺度离田排放系数的计算

排水口监测点位每月的农田面源污染排放负荷按下式计算：

$$L' = \frac{R_2}{R_1} \cdot \sum_{k=1}^m L_k, \quad (4)$$

式中： L' 为排水口监测点位当月的农田面源污染排放负荷 (kg)； L_k 为排水口监测点位在第 k 次产流事件产生的农田面源污染负荷量 (kg)； R_1 为排水口监测点位当月开展水质监测的径流事件的地表径流量 (m³)； R_2 为排水口监测点位当月径流事件的地表径流总量 (m³)； m 为排水口监测点位当月产流事件的次数。

月尺度离田排放系数按下式计算：

$$DC_{月} = \frac{L'}{A \cdot T}, \quad (5)$$

式中： $DC_{月}$ 为月尺度离田排放系数 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$)； T' 为时间 (月)。

1.5 数据处理

采用 SPSS25.0 软件对数据进行处理和分析，采用 Origin 2019 和 Microsoft Excel 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 日尺度下的离田排放系数变化特征

旱地日尺度氮排放系数变化特征如图 1 (a) 所示。总氮、硝态氮、氨氮的日排放系数变化范围分别为 2.2~9 843.9、0.1~7 418.3、0.01~428.8 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。受施肥影响 (表 1)，2020 年 9 月 17 日、2020 年 11 月 25 日和 2022 年 9 月 12 日的氮排放系数显著高于其他时间；硝态氮与总氮日排放系数的比值在绝大

多数时间均超过 70%，说明硝态氮是旱地氮素排放的主要形式。主要原因是研究区粉砂土疏松透气，有利于氨氮向硝态氮的转化^[19]，同硝态氮所带负电荷与土壤胶体相互排斥，在降水驱动下，更易随农田地表径流排入受纳沟渠^[20]。

旱地日尺度磷排放系数变化特征如图 1 (b) 所示。总磷、溶解性总磷的日排放系数变化范围分别为 0.08~667.0、0.01~385.7 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ，在降水集中分布的情况下 (2021 年 7 月 27 日和 2021 年 7 月 31 日降水量分别为 122 mm 和 75 mm)，磷日排放系数显著增大，这与郭智等^[21]研究结果一致。在近 41.6% 的产流事件中，溶解性总磷与总磷的日排放系数之比 <50%，说明在绝大多数时间下，磷并非以溶解态磷形式排放，而主要以颗粒态磷形式进行排放，这是因为颗粒态磷易吸附在泥沙表面^[22]。

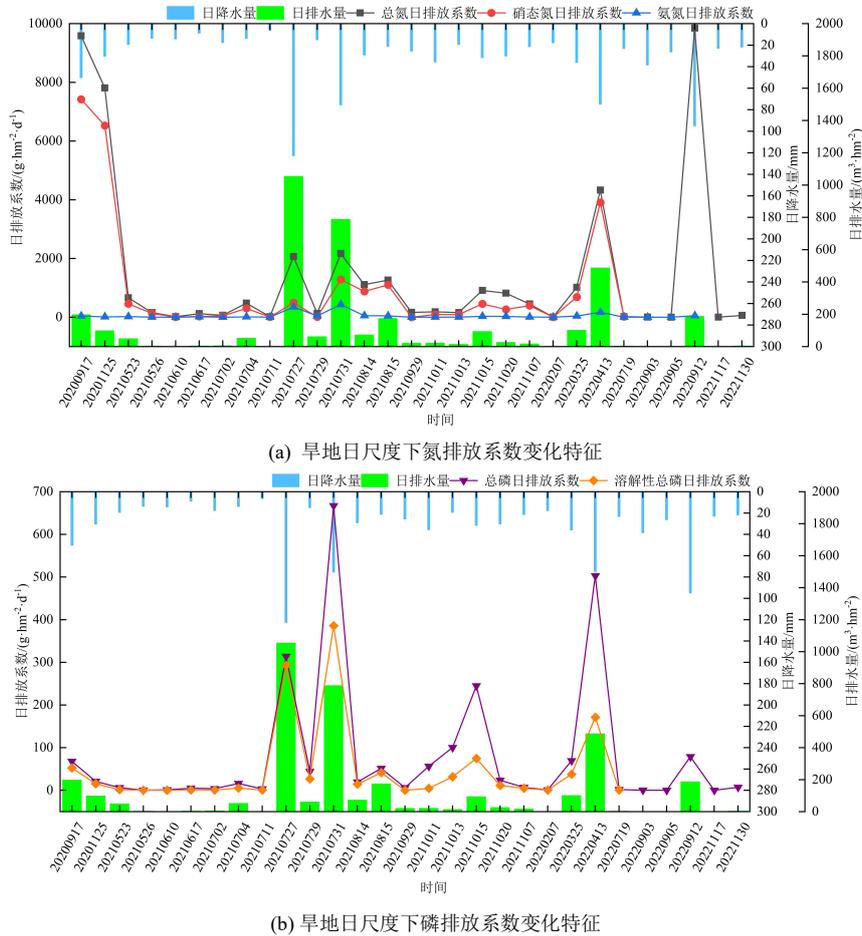


图 1 旱地日尺度下离田排放系数变化特征

Fig.1 Variation characteristics of off-field discharge coefficients at daily scale in dryland

2.2 月尺度下的离田排放系数变化特征

旱地月尺度氮排放系数变化特征如图 2 (a) 所示。总氮、硝态氮、氨氮的月排放系数变化范围分别为 0.02~17.2、0.01~9.2、0.001~0.83 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ 。总氮月排放系数较大 ($>7 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$) 的月份出现在 2020 年 9 月、2022 年 9 月和 2020 年 11 月，其中

2020 年 9 月和 2022 年 9 月均有施肥事件 (表 1)，故其总氮月排放系数较高。旱地月尺度磷排放系数变化特征如图 2 (b) 所示。总磷、溶解性总磷的月排放系数变化范围分别为 0.001~1.04、0.000 2~0.71 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ 。当月降水量 >150 mm 时，总磷和溶解性总磷月排放系数会显著增大。总磷和总氮的月排

放系数变化趋势并不一致，月总氮排放系数和总磷排放系数的比值变化范围为 4.5~141.5。

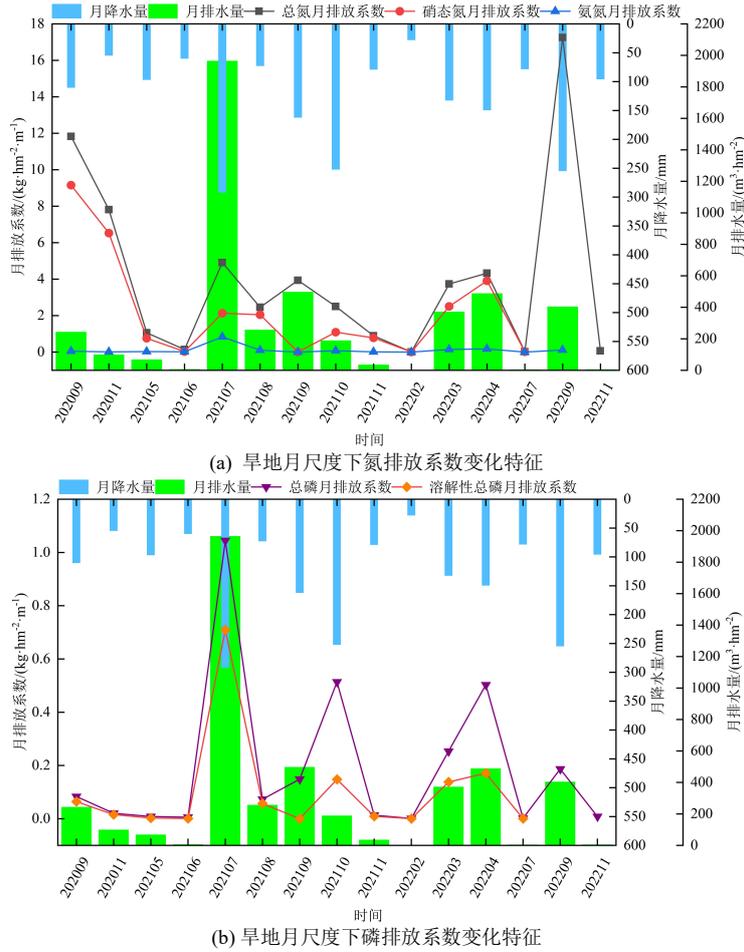


图 2 旱地月尺度下离田排放系数变化特征

Fig.2 Variation characteristics of off-field discharge coefficients at monthly scale in dryland

2.3 不同时间尺度排放系数与降水量、排水量的关系

由表 2 可知，总氮、总磷、溶解性总磷的日排放系数与日降水量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，氨氮、总磷、溶解性总磷的日排放系数与日排水量呈极显著正相关。根据我国气象行业标准 (QX/T 489-2019)，日降水事件可划分为小雨 (0.1~9.9 mm)、中雨 (10.0~24.9 mm)、大雨 (25.0~49.9 mm)、暴雨 (50.0~99.9 mm)、大暴雨 (100.0~249.9 mm)、特大暴雨 (≥ 250.0 mm) [23]；本研究发现，只有当日降水量变大 (>25 mm) 时，氨氮日排放系数才会变大，这是因为氨氮在土壤中的移动性小于硝态氮 [24]，只有当日降水量等级为大雨乃至暴雨后才会引起氨氮流失，故氨氮日排放系数与日降水量无显著相关性。此外，总氮和硝态氮的月排放系数与月降水量、月排水量的相关性均不显著 ($P>0.05$)。

2.4 不同时间尺度排放系数之间的关系

为进一步厘清日尺度和小时尺度排放系数之间的关系，本研究对产流事件的时均排放系数与该次产流事件的日排放系数进行线性拟合。由图 3 可知，各指标日排放系数均与时均排放系数极显著正相关 ($P<0.01$)，根据拟合方程，各指标时均排放系数每

增加 $10 \text{ g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，总氮、硝态氮、氨氮、总磷、溶解性总磷的日排放系数分别增加 205.8、273.7、137.3、129.8、134.9 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。可以看出，在氮素中，硝态氮日排放系数对时均排放系数的变化最敏感；在磷素中，溶解性总磷日排放系数对时均排放系数的变化最敏感。

表 2 不同尺度氮磷排放系数与降水量、排水量的关系

Tab.2 Correlation analysis of nitrogen and phosphorus discharge coefficients with rainfall and drainage at different scales

尺度	指标	<i>r</i>	
		日(月)降水量	日(月)排水量
日	总氮排放系数	0.552**	0.301
	硝态氮排放系数	0.309	0.207
	氨氮排放系数	0.451	0.957**
	总磷排放系数	0.667**	0.820**
	溶解性总磷排放系数	0.860**	0.949**
月	总氮排放系数	0.461	0.240
	硝态氮排放系数	0.009	0.074
	氨氮排放系数	0.652*	0.965**
	总磷排放系数	0.814**	0.892**
	溶解性总磷排放系数	0.791**	0.957**

注 *表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关，**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

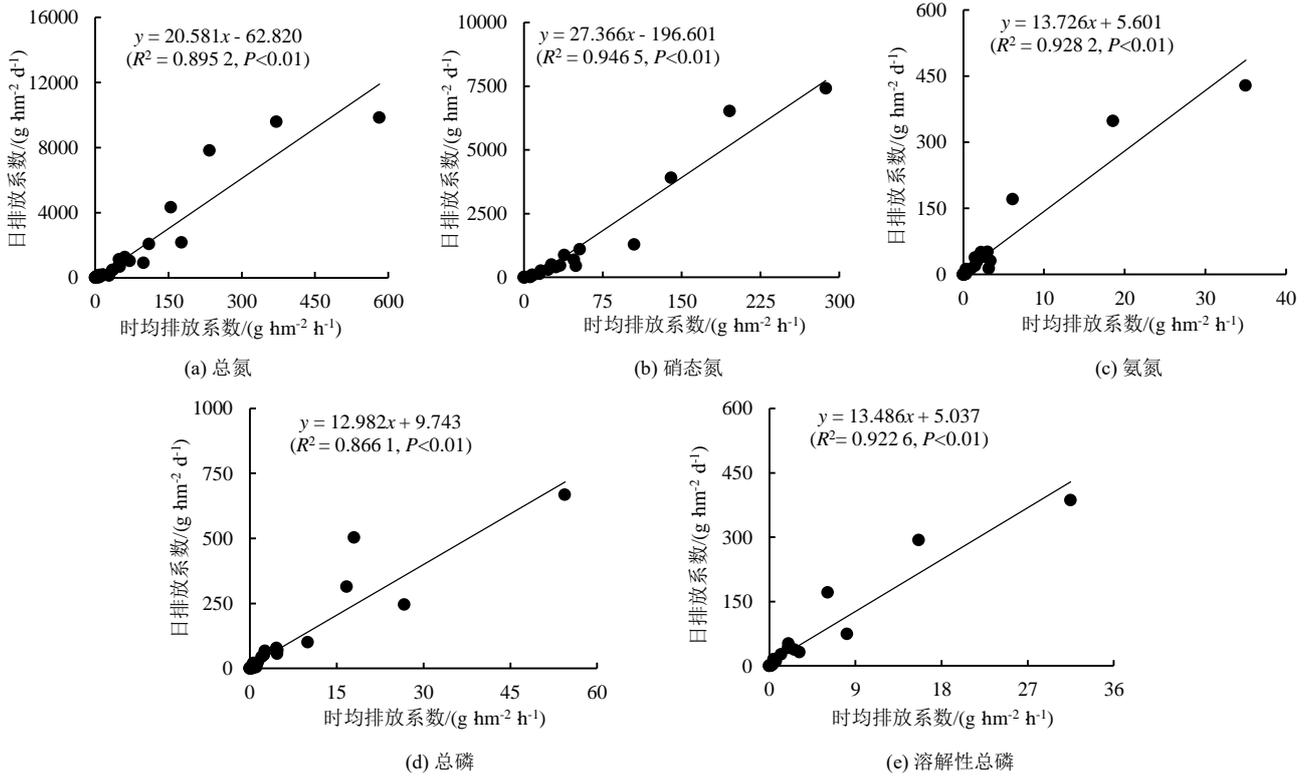


图 3 不同指标日排放系数和时均排放系数的关系

Fig.3 The relationship between daily discharge coefficients and hourly average discharge coefficients under different indexes

为进一步厘清月尺度和日尺度排放系数之间的关系，本研究对日平均排放系数与月排放系数进行线性拟合。由图 4 可知，各指标月排放系数均与日平均排放系数极显著或显著正相关。根据拟合方程，各指标日平均排放系数每增加 1 000 g/ (hm²·d)，总

氮、硝态氮、氨氮、总磷、溶解性总磷的月排放系数分别增加 1.1、1.0、2.9、1.4、2.5 kg/ (hm²·m)。可以看出，在氮素中，氨氮月排放系数对日平均排放系数的变化最敏感；在磷素中，溶解性总磷月排放系数对日平均排放系数的变化最敏感。

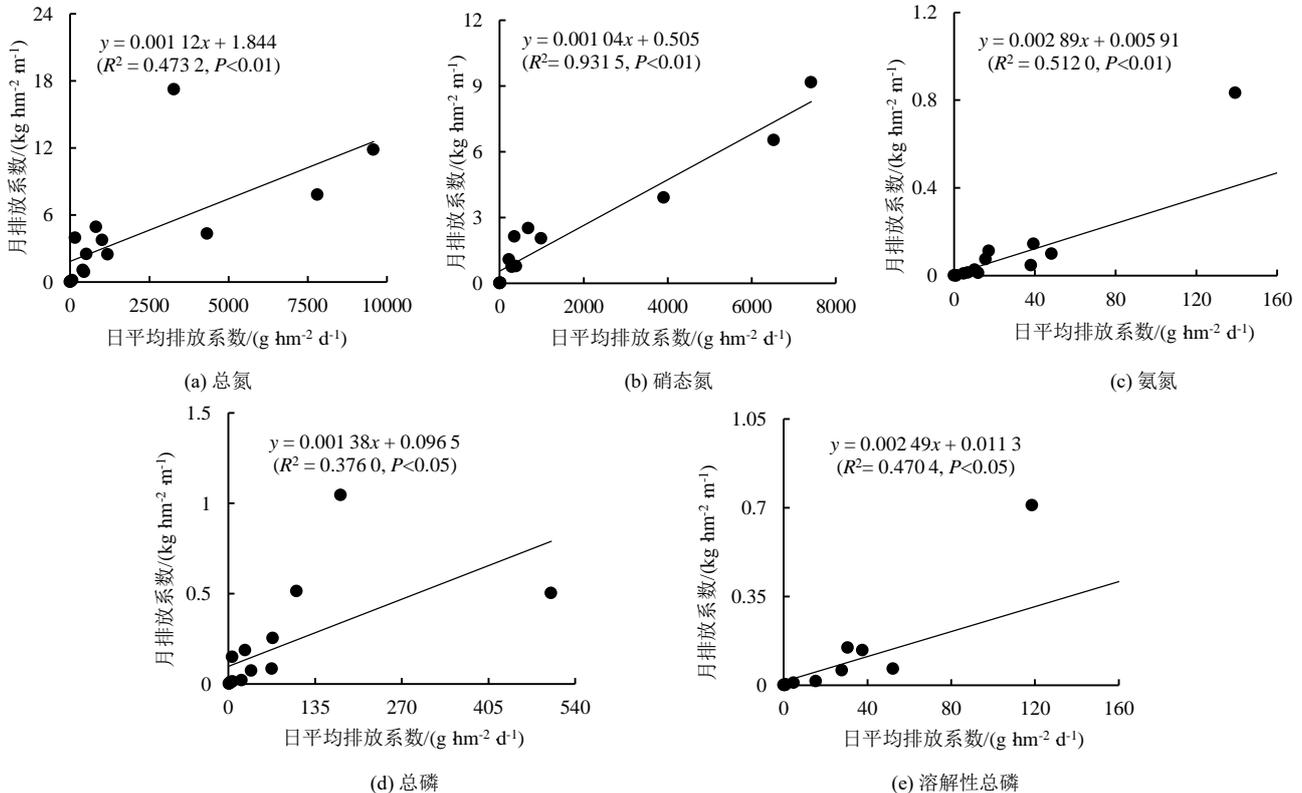


图 4 不同指标月排放系数和日平均排放系数的关系

Fig.4 The relationship between monthly discharge coefficients and daily average discharge coefficients under different indexes

3 讨论

本研究选取与降水特征有关的 7 个因素：降水历时 (h)、产流事件总降水量 (mm)、平均降水强度 (mm/h)、最大小时降水强度 (mm/h)、最大小时降水强度出现时间 (h)、径流前期降水量 (mm) 和雨峰系数，分析降水特征对排放系数的影响。其中，雨峰系数定义如下：

$$r = \frac{t}{T}, \quad (6)$$

式中： r 为雨峰系数，表征雨峰在时间分布上出现的位置，取值为 0~1， r 越小表示雨峰出现位置越靠前，反之则越靠后； t 为最大小时降水强度出现时间 (h)； T 为降水历时 (h)。

由表 3 可知，总氮、硝态氮排放系数均与降水

历时极显著正相关，这主要是由于在降水初期，降水对总氮、硝态氮的排放产生了冲刷效应^[25-26]；降水过程中，大气中的氮素会在降水的湿沉降作用下进入田间地表水系统^[27]；而在降水末期，降水对总氮、硝态氮产生后期累加效应。总磷、溶解性总磷排放系数均与产流事件总降水量、平均降水强度、最大小时降水强度极显著正相关。这是因为磷素主要富集于表层土壤，在旱地中易受到降水的侵蚀^[28-29]，尤其是在地表裸露情况下，降水强度和总降水量加剧了侵蚀作用。氮、磷离田排放系数与雨峰系数之间的相关性均不显著；以往研究指出，上海雨峰系数为 0.405，污染物离田排放系数并不受雨峰系数细微变化的影响^[30]。

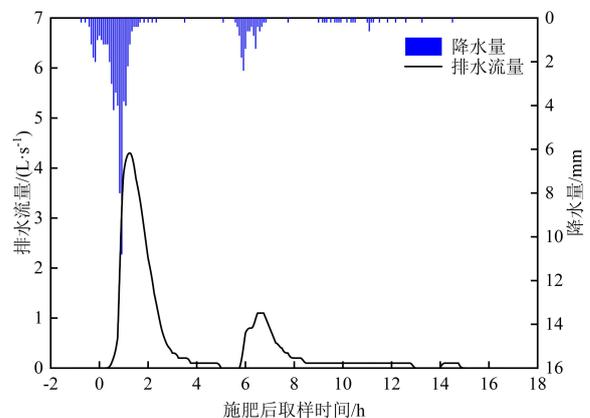
表 3 污染物排放系数和降水特征之间的相关系数

Tab.3 Correlation coefficients between discharge coefficients of pollutants from field and precipitation characteristics

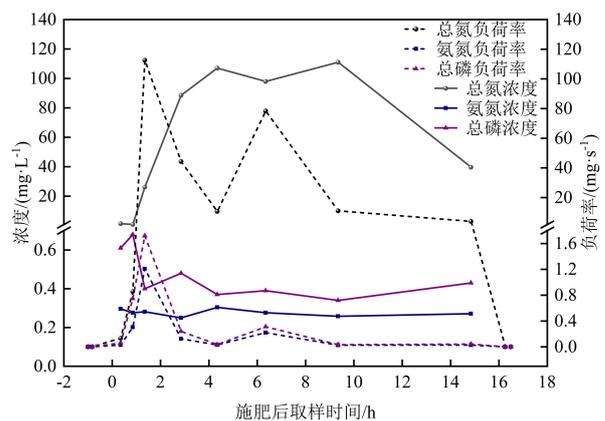
指标	降水历时	产流事件总降水量	平均降水强度	最大小时降水强度	最大小时降水强度出现时间	径流前期降水量	雨峰系数
总氮排放系数	0.632**	0.535**	0.002	0.262	0.296	-0.056	-0.254
硝态氮排放系数	0.724**	0.332	-0.075	-0.017	0.275	-0.272	-0.327
氨氮排放系数	-0.031	0.451	0.644**	0.624**	0.058	0.138	-0.066
总磷排放系数	-0.110	0.663**	0.647**	0.672**	-0.021	-0.101	0.025
溶解性总磷排放系数	-0.020	0.857**	0.649**	0.802**	0.079	0.157	-0.001

注 *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关，**表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

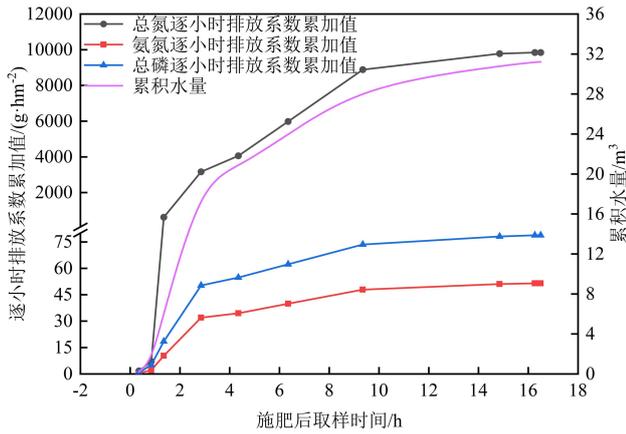
施肥当日污染物排放特征及水文水质变化详见图 5。该日施肥情况见表 1，取样时间以施肥开始时间作为基准（零时），负号代表施肥前取样时间。由图 5 (a) 可知，在降水发生后的 1.25 h，农田开始产流，并在施肥之后的 1.16 h 排水流量达到峰值 (4.3 L/s)，产流持续时间为 14.5 h，累积产流量为 31.21 m³。由图 5 (b) 可知，总氮浓度峰值出现在施肥后的 4.35 h (峰值浓度为 107.0 mg/L)，比排水脉冲晚发生 3.19 h，时间相位差 (“错峰”现象) 导致总氮负荷率出现 2 次峰值；氨氮浓度变化较为平稳，其负荷率出现 1 次较为明显的峰值，表明氨氮负荷率变化过程和排水脉冲同步；总磷浓度在施肥后的 0.85 h 迅速达到峰值，第一次达到峰值受总磷浓度和排水流量迅速增大的双重影响，第二次达到峰值主要受排水脉冲影响。由图 5 (c) 可知，施肥后的 0~2.85 h，总氮、氨氮、总磷小时排放系数分别为 1 110.9、11.2、17.6 g/(hm²·h)，此期间的逐小时排放系数累加值分别为 3 166.1、31.9、50.3 g/hm²，分别占最大逐小时排放系数累加值的 32.1%，62.0%，63.8%。可以看出，施肥后短时间内的排水承担了绝大部分的氮素和磷素排放量。



(a) 施肥当日降水量与排水流量变化过程



(b) 施肥当日污染物浓度与负荷率变化过程



(c) 施肥当日逐小时排放系数累加值与累积水量变化过程

图 5 施肥当日污染物排放特征及水文水质变化情况

Fig.5 Pollutant discharge characteristics and hydrological and water quality changes on fertilization day

地表径流作为面源污染的主要输出载体，有必要进一步分析其对排放系数造成的影响。本研究设立 3 种时间尺度（小时、日、月），分别在各时间尺度下对各指标排放系数与地表径流进行回归分析。结果表明，氨氮、总磷、溶解性总磷排放系数均与地表径流呈极显著正相关（表 4）。在小时尺度下，地表径流每增加 10 mm/h，总氮、硝态氮、氨氮、总磷和溶解性总磷排放系数分别增加 259.0、95.9、44.7、62.1、40.1 g/ (hm²·h)；在日尺度下，地表径流每增加 10 mm/d，总氮、硝态氮、氨氮、总磷和溶解性总磷排放系数分别增加 342.1、175.9、39.5、53.1、35.0 g/ (hm²·d)；在月尺度下，地表径流每增加 1 000 mm/m，总氮、硝态氮、氨氮、总磷和溶解性总磷排放系数分别增加 23.9、4.0、4.1、5.3、3.5 kg/ (hm²·m)。

表 4 不同尺度下氮、磷排放系数与地表径流的关系

Tab.4 Relationship between nitrogen and phosphorus discharge coefficients and surface runoff under different scales

尺度	指标	回归方程	样本量	R ²	显著性水平
小时	总氮排放系数	y=25.900x+57.209	29	0.095 16	0.103
	硝态氮排放系数	y=9.591x+37.841	24	0.050 78	0.290
	氨氮排放系数	y=4.472x-0.305	27	0.923 2	0.000
	总磷排放系数	y=6.208x+0.876	29	0.694 9	0.000
	溶解性总磷排放系数	y=4.012x-0.166	24	0.901 0	0.000
日	总氮排放系数	y=34.212x+1 085.709	29	0.090 52	0.113
	硝态氮排放系数	y=17.592x+632.464	24	0.053 76	0.331
	氨氮排放系数	y=3.946x-1.829	27	0.915 3	0.000
	总磷排放系数	y=5.312x+15.043	29	0.674 5	0.000
	溶解性总磷排放系数	y=3.499x+0.056 3	24	0.900 0	0.000
月	总氮排放系数	y=0.023 9x+3.324	15	0.057 46	0.390
	硝态氮排放系数	y=0.003 98x+2.097	13	0.005 490	0.810
	氨氮排放系数	y=0.004 14x-0.026 0	14	0.932 1	0.000
	总磷排放系数	y=0.005 29x+0.028 0	15	0.795 2	0.000
	溶解性总磷排放系数	y=0.003 53x-0.013 1	13	0.915 6	0.000

注 y表示不同指标的排放系数，小时尺度下单位：g/ (hm²·h)，日尺度下单位：g/ (hm²·d)，月尺度下单位：kg/ (hm²·m)；x表示地表径流，小时尺度下单位：mm/h，日尺度下单位：mm/d，月尺度下单位：mm/m。

4 结论

1) 在降水产流事件中，总氮离田排放系数与降水历时极显著正相关，总磷离田排放系数与产流事件的总降水量、平均降水强度、最大小时降水强度极显著正相关。

2) 施肥后，总氮日排放系数迅速增大，总磷日排放系数无明显变化。各时间尺度下，总氮排放系数与地表径流不存在显著相关性，总磷排放系数与地表径流极显著正相关。

3) 氮、磷离田排放系数的日、月际变化幅度较大，总氮离田排放系数易受施肥措施影响，总磷离田排放系数则更易受降水和地表径流影响。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] ZHOU J H, LIU X H, LIU X J, et al. Assessing agricultural non-point source pollution loads in typical basins of upper Yellow River by incorporating critical impacting factors[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 177: 17-28.
- [2] BRYAN B A, KANDULU J M. Designing a policy mix and sequence for mitigating agricultural non-point source pollution in a water supply catchment[J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 875-892.
- [3] XU L Y, JIANG J, LU M Y, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of agricultural intensive management and its influence on agricultural non-point source pollution in China[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 371.
- [4] SHOU C G, DU H S, LIU X P. Research progress of source and mechanism of agricultural non-point source pollution in China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(5): 10 611-10 621.
- [5] BAI J J, LI Y Z, SUN W S. Research on emission characteristics of agricultural non-point source pollution based on Kuznets fitting curve[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(14): 1 324.

- [6] 吴蒙. 基于农田灌溉系统水能关系的农业节水管理分区研究: 以上海为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 116-122, 128.
WU Meng. Exploring agricultural water-saving regionalization based on the water-energy nexus: A case study of Shanghai[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 116-122, 128.
- [7] 袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.
YUAN Wen, YANG Kai, TANG Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network[J]. Geographical Research, 2005, 24(5): 717-724.
- [8] 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 等. 不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4 647-4 654.
LIU Xinyu, LU Jiang, MENG Xuan, et al. Analysis on change in soil organic carbon content of farmland in Yangtze River economic belt under different fertilizing measures[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4 647-4 654.
- [9] 陈昱, 刘方平, 吴彩云, 等. 鄱阳湖流域典型种植模式农田地表径流与氮磷流失特征[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 101-108.
CHEN Yu, LIU Fangping, WU Caiyun, et al. Impact of planting practices on nitrogen and phosphorus loss via surface runoff in Poyang Lake basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 101-108.
- [10] XIE H, DONG J W, SHEN Z Y, et al. Intra- and inter-event characteristics and controlling factors of agricultural nonpoint source pollution under different types of rainfall-runoff events[J]. CATENA, 2019, 182: 104-105.
- [11] WU L, GAO J N, MA X Y, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10 647-10 660.
- [12] DU X Z, LI X Y, ZHANG W S, et al. Variations in source apportionments of nutrient load among seasons and hydrological years in a semi-arid watershed: GWLF model results[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2014, 21(10): 6 506-6 515.
- [13] HAITH D A, MANDEL R, WU R S. GWLF: Generalized Watershed Loading Functions, Version 2.0, User's Manual[M]. Dept of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 1992.
- [14] YUAN C C, LIU L M, YE J W, et al. Assessing the effects of rural livelihood transition on non-point source pollution: A coupled ABM-IECM model[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(14): 12 899-12 917.
- [15] YU J H, MIN K S, KIM Y. Development of EMC-based empirical model for estimating spatial distribution of pollutant loads[J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 27(1/2/3): 175-188.
- [16] 孟凡德, 耿润哲, 欧洋, 等. 最佳管理措施评估方法研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1 357-1 366.
MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al. A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1 357-1 366.
- [17] XIN X K, YIN W, LI K F. Estimation of non-point source pollution loads with flux method in Danjiangkou Reservoir area, China[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(2): 134-142.
- [18] 于涛, 孟伟, ONGLEY E, 等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 401-407.
YU Tao, MENG Wei, ONGLEY E, et al. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 401-407.
- [19] 徐勇峰. 洪泽湖河网交汇处麦稻两熟农田径流氮磷流失特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
Xu Yongfeng. Study on nutrient runoff character of wheat-rice double cropping system field in meeting place of Hung-tse Lake and Huaihe River[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [20] 张金波, 程谊, 蔡祖聪. 土壤调配氮素迁移转化的机理[J]. 地球科学进展, 2019, 34(1): 11-19.
ZHANG Jinbo, CHENG Yi, CAI Zucong. The mechanisms of soil regulating nitrogen dynamics[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(1): 11-19.
- [21] 郭智, 刘红江, 陈留根, 等. 有机肥施用对菜地磷素径流流失及磷素表观利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 181-186.
GUO Zhi, LIU Hongjiang, CHEN Liugen, et al. Effects of organic manure application on phosphorus(P) losses by surface runoff and apparent P use efficiency in the vegetable field of Chinese waxgourd(*Benincasa hispida* cogn.)[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 181-186.
- [22] 潘旭鸣, 丁淼, 周宇诚, 等. 蔬菜地氮磷径流流失量及其规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(10): 2 262-2 268.
PAN Xuming, DING Miao, ZHOU Yucheng, et al. The amounts of nitrogen and phosphorus losses from a vegetable field via runoff[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(10): 2 262-2 268.
- [23] 中国气象局. 降雨过程等级: QX/T 489—2019[S]. 北京: 气象出版社, 2019.
- [24] 李国栋, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 905-910.
LI Guodong, HU Zhengyi, YANG Linzhang, et al. Soil nitrogen and phosphorus losses with surface runoff from typical vegetable field of Taihu Lake region and their control with grass buffer strip[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(8): 905-910.
- [25] 赵嵩林, 刘华勇, 谢纪强, 等. 受闸坝影响的城市河段纳污能力研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 141-147.
ZHAO Songlin, LIU Huayong, XIE Jiqiang, et al. Research on pollutant carrying capacity of urban river affected by dam and gate[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2023, 51(4): 141-147.
- [26] 杨海洋, 袁远, 王江彦, 等. 降雨强度和秸秆还田对淮河流域褐土非点源氮输出影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 75-82.
YANG Haiyang, YUAN Yuan, WANG Jiangyan, et al. The efficacy of amending soil with straw to reduce nitrogen loss from watersheds under different rainfalls in Huaihe River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 75-82.
- [27] 曾杰, 吴起鑫, 李思亮, 等. 雨季喀斯特小流域氮输出特征及其受降雨的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 73-78.
ZENG Jie, WU Qixin, LI Siliang, et al. Characteristics of nitrogen export and the effects of rainfall during the rainy season in a Karst small catchment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 73-78.
- [28] 钱晓雅, 沈根祥, 黄丽华, 等. 崇明东滩旱作农田土壤磷素流失及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 334-338.
QIAN Xiaoyong, SHEN Genxiang, HUANG Lihua, et al. Loss of soil phosphorus from rain-fed cropland and its affecting factors in Dongtan of Chongming[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(4): 334-338.
- [29] 朱浩宇, 贾安都, 王子芳, 等. 化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 342-352.
ZHU Haoyu, JIA Andu, WANG Zifang, et al. Effects of chemical fertilizer reduction on phosphorus loss in slope purple soil farmland[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 342-352.
- [30] 蒋明. 新暴雨形势下上海市设计暴雨雨型研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2015, 28(2): 69-73, 80.
JIANG Ming. Study of Shanghai design rainstorm profile under the new rainstorm situation[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2015, 28(2): 69-73, 80.

Temporal variation in discharge coefficients of non-point source pollution and its determinants in river-network areas in a plain

DUANMU Jiayao^{1,2}, CHEN Cheng², CHEN Xiaohua², SHEN Genxiang^{1,2*}, ZHANG Min²,
GUO Chunxia², WANG Zhenqi², BAI Yujie², LING Zhixiong^{1,2}, CAO Guomin^{1*}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Health Impact Assessment of Emerging Contaminants, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: 【Objective】 Discharge coefficient is a coefficient describing the discharge of non-point source pollution to water bodies. It is affected by many biotic and abiotic factors. In this paper, we analyze its variation in typical drylands in river network areas in a plain. 【Method】 The studied area is located at the Chongming Island, Shanghai. A hydrology-water quality collaborative monitoring system was constructed in the island, which can accurately calculate the discharge coefficient of non-point source pollution, identify its temporal variation, and analyze the underlying influencing factors. 【Result】 ① Daily discharge coefficient of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) is 2.2-9 843.9 and 0.08-667.0 g/(hm²·d), respectively; monthly discharge coefficients of TN and TP is 0.02-17.2 and 0.001-1.04 kg/(hm²·m) respectively. ② The total nitrogen discharge coefficient during precipitation runoff period is significantly positively correlated with duration of the precipitation, while the TP discharge coefficient is significantly positively correlated with the total precipitation, average precipitation intensity, and maximum hourly precipitation intensity. ③ Following fertilization, the daily discharge coefficient of TN increases rapidly, while the daily discharge coefficient of TP remains almost unchanged. ④ At different time scales, there is no notable correlation between TN discharge coefficient and surface runoff, whereas the TP discharge coefficient exhibits a significant positive correlation with surface runoff. 【Conclusion】 The discharge coefficients of nitrogen and phosphorus vary with time scales, with significant differences observed between daily and monthly discharge coefficients. TN discharge coefficient is primarily influenced by fertilization, whereas TP discharge coefficient is more sensitive to precipitation and surface runoff.

Key words: plain river-network; dryland; non-point source pollution; collaborative monitoring; discharge coefficient

责任编辑：韩洋