

稻田田面水与排水径流中胶体磷流失贡献及流失规律

闫大伟, 梁新强, 王飞儿, 周俊杰, 周晓颖, 田光明

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 通过野外试验采集稻田田面水和稻田排水径流的水样, 研究了胶体磷流失贡献和流失规律。根据实际天气情况, 选择1次典型暴雨事件(48 mm/h)和8次不同强度(8, 9, 19, 23, 23, 32, 36, 49 mm/h)的降雨事件采集样品。结果表明: (1) 田面水和稻田排水中磷素流失形式以颗粒磷为主。在过1 μm 滤膜的总磷中, 胶体磷的流失贡献为21%~73%, 超过真溶解磷的流失贡献。(2) 降雨后田面水中胶体磷的贡献范围为9%~44%, 稻田排水中胶体磷流失贡献范围为10%~16%, 金属氧化物胶体、有机质胶体以及金属氧化物—有机质胶体浓度与胶体磷流失贡献呈正向相关性, 田面水中皮尔森相关系数分别为0.544, 0.635, 0.781 ($p < 0.05$), 稻田排水中分别为0.734, 0.350, 0.747 ($p < 0.05$), 三者结合磷为径流中胶体磷的重要赋存形态。(3) 施肥通过影响电导率和离子强度来削减胶体磷的流失贡献, 而降雨强度则通过影响pH来增加胶体磷的流失贡献, 降雨强度与稻田排水胶体磷流失浓度的线性回归系数 $R^2 = 0.75$, 但两者对田面水和稻田排水中胶体磷流失贡献的影响程度不同。

关键词: 田面水; 稻田排水; 胶体磷; 流失贡献; 流失规律

中图分类号: S158.3; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0047-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.007

Contribution of Colloidal Phosphorus Loss in Runoff of Paddy Surface Water and Drainage

YAN Dawei, LIANG Xinqiang, WANG Feier, ZHOU Junjie, ZHOU Xiaoying, TIAN Guangming

(College of Environment & Resources Science of Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: In order to reveal the contribution of colloidal phosphorus to the loss of total phosphorus, we carried out a field experiment to collect the water of paddy surface and ditches under typical rainfall events. According to the actual weather conditions, we selected a typical rainstorm event (48 mm/h) and eight rainfall events with different intensities of 8, 9, 19, 23, 23, 32, 36, and 49 mm/h. The results showed that: (1) Phosphorus loss in the surface water and paddy field drainage was mainly composed of particle phosphorus. In the total phosphorus passed over the 1 μm filter, the loss of colloidal phosphorus accounted for 21%~73%, even exceeding the loss contribution of true dissolved phosphorus. (2) The contribution of colloidal phosphorus in the surface water after rainfall was 9%~44%, and the contribution of colloidal phosphorus loss in paddy field drainage was 10%~16%. There was positively correlation among metal oxide colloid, organic colloid, metal oxide-organic colloid and colloidal phosphorus loss contribution. The correlation coefficients in the surface water were 0.544, 0.635, 0.781 ($p < 0.05$), and the corresponding values in the drainage in the paddy field were 0.734, 0.350, 0.747 ($p < 0.05$), respectively. They were the important forms of colloidal phosphorus in runoff. (3) Fertilization reduced the contribution of colloidal phosphorus loss by affecting conductivity and ionic strength, while rainfall intensity increased the contribution of colloidal phosphorus loss by affecting pH value. The R^2 value of linear regression coefficient of rainfall intensity and colloidal phosphorus concentration of drainage in the paddy field was 0.75, but the degree of influence on the loss of colloidal phosphorus in the surface water and rice field drainage was different.

Keywords: field surface water; paddy drainage; colloidal phosphorus; loss contribution; rule of loss

收稿日期: 2019-04-10

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206-001); 国家重点研究与发展计划项目(2017YFD0800103); 浙江省自然科学基金项目(LR16B070001)

第一作者: 闫大伟(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染治理研究。E-mail: 21614079@zju.edu.cn

通信作者: 梁新强(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业面源污染治理研究。E-mail: liang410@zju.edu.cn

在以往的研究中,降雨径流中的磷素大多按粒径分为颗粒磷和溶解磷,即以 $0.45\ \mu\text{m}$ 为界限,粒径 $<0.45\ \mu\text{m}$ 的磷素划分为溶解磷, $>0.45\ \mu\text{m}$ 的磷素为颗粒磷^[1],但是,随着对磷素粒径分级研究的不断深入,越来越多的学者^[2]发现,通过此方法测得的溶解磷含量被高估了,进而对富营养化水平产生了错误的评估,主要是因为粒径介于溶解磷和颗粒磷中间的胶体磷(粒径为 $1\ \text{nm}\sim 1\ \mu\text{m}$)在磷素的迁移、转化中起到了重要作用。Christoff 等^[2]发现,胶体磷的存在导致地表水中溶解磷浓度增加了 1 倍,我国学者孙小静等^[3]发现,太湖部分湖区的胶体磷可占到水体中总磷的 39%。此外,溶解磷按照化学性质又可以分为钼蓝反应磷(MRP)和钼蓝非反应磷(MUP)^[4],MUP 的主要成分有机磷需要经过矿化为无机磷才会被吸收,生物直接可利用性小于 20%^[5],而 MRP 的主要成分磷酸根离子通常被认为是藻类直接吸收的磷,进而受到广泛关注,胶体磷也分为 MRP 和 MUP,其中胶体 MRP 水解后无需矿化就可被吸收^[6]。此外,胶体磷的粒径范围为 $1\sim 1\ 000\ \text{nm}$ ^[6],大多数植物^[7]和藻类^[8]的细胞壁为 $5\sim 15\ \text{nm}$;从养分吸收的运输尺寸上讲,植物和藻类不能直接吸收大部分胶体磷,但胶体磷对磷素生物可利用性的贡献不在于自身是否会被直接吸收,而在于其可以促进无机磷吸收,有学者^[6]研究表明,胶体磷的存在会促进植物的根部扩散吸收,与无胶体磷的对照组相比磷的吸收量增加了 4 倍,胶体磷也会促进藻类的磷素吸收,我国学者周理斌等^[9]认为,这主要是因为胶体磷在碱性磷酸酶水解下被藻类吸收。此外,由于胶体磷自身的布朗运动,使其可以随径流长距离运输,并在水体表层长期保持悬浮状态^[10],对水体富营养化具有潜在风险。降雨作为促进土壤磷素流失的重要因素之一^[11],但以往的文章中主要以颗粒磷和溶解磷作为磷素流失的研究对象,而将胶体磷作为主要研究对象还较少。土壤胶体的活化迁移是胶体磷流失的前提,而其活化迁移是通过外界环境变化改变维持胶体稳定性的多种作用力来实现的。即静电力(压缩双电层斥力)、范德华力(引力)、水合力(斥力^[12]),在三者的共同作用下胶体发生分散和凝聚^[13],静电力和水合力受胶体表面电荷密度(静电斥力)和表面偶极密度(水合斥力)影响较大^[12],即随着离子强度的增加,使双电层密度增加,进而减少胶体间的短程斥力,范德华力占据主导地位^[14],胶体聚集成单粒或者团粒,而随着离子强度降低,则反之^[15]。姚毓菲等^[13]在未布施的雨水中加入硝酸钙后,发现模拟降雨径流中的水分散性胶体含量减少,土壤流失量也被

削减,且高浓度的硝酸钙削减效果更好。类似的规律在土壤胶体磷流失中同样被发现,Koopmans 等^[16]以荷兰的高黏土为研究对象,对比有无添加氯化钠的水提液中 MRP 磷含量,发现添加氯化钠后,使得通过“传统” $0.45\ \mu\text{m}$ 膜过滤法测得的 MRP 含量降低了 93%,这主要是由于高离子强度下胶体磷絮凝为大颗粒,被膜过滤去除。另外,在一定的条件下,电导率与离子强度呈线性关系,因此,土壤的电导率也会对胶体磷的稳定产生一定的影响^[17],Zhang^[17]针对不同土壤理化性质的土壤中磷流失机制研究发现,土壤电导率与胶体磷流失为负相关,电导率高的土壤中胶体磷的流失受到抑制。此外,pH 也对胶体磷的稳定性具有显著影响,Liang 等^[18]在 pH 对胶体磷流失影响的研究中发现,以 $\text{pH}=6$ 为转折点,提取土壤溶液的去离子水 pH 越低,胶体磷的流失量越大,且提取液中胶体 Fe 和胶体磷浓度具有正向的相关性。这主要有 2 个原因:首先,低 pH 条件下,大量的氢离子会溶解黏土矿物的金属氧化物胶膜,进而释放出胶体磷物质^[18];其次,氢离子的大量存在会与有些酸不稳定的有机质—金属—磷胶体竞争吸附位点,进而增加胶体磷的流失贡献^[19]。本研究选择水稻田田面水和邻近稻田排水中各粒级磷素作为研究对象,主要研究了 3 个问题:(1)降雨历程中水稻田田面水和稻田排水径流中胶体磷的流失贡献;(2)径流中胶体磷的赋存形态;(3)水稻田田面水和稻田排水径流中胶体磷的流失贡献和流失规律。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本试验区为苕溪流域中游的杭州市余杭区径山镇画境种业有限公司苗木基地内的水稻田($119^{\circ}53'26''\text{E}$, $30^{\circ}22'53''\text{N}$),种植区面积 $27\ 398\ \text{m}^2$,每年只种植 1 季水稻,种植期为 5—11 月。共有 2 次施肥时间,分别为 3 月 10 日和 6 月 10 日。该地为亚热带季风区气候,2017 年年均气温 $15.8\ ^{\circ}\text{C}$,年均降水天数 143 d,年均降水量 $1\ 556.5\ \text{mm}$ 。不同季节降雨量差距显著,降雨较集中于 3、9 月,降水量均超过 $100\ \text{mm}$ 。

1.2 研究方法

选取 2017 年 4 月 2 日、5 月 3 日、5 月 17 日、6 月 15 日、8 月 2 日、8 月 9 日、8 月 16 日、9 月 11 日发生的 8 次降雨事件,采集稻田出水口和沟渠径流的水样,采样位置为水下 $5\ \text{cm}$ 。此外,选取 2017 年 6 月 25 日发生的 1 次暴雨事件,在降雨开始后 5,15,20,30,45,60,90,120,150,180 min 采集田面水和稻田排水(表 1)。

浊度采用浊度仪监测,pH 采用 Hach570 pH 计

测定,COD 采用室外高锰酸钾法测定。总磷采用《水和废水监测分析方法》第 4 版国际方法^[20]。真溶解磷和胶体磷的测定方法^[18]为:水样用 1 μm 滤膜过滤,将滤液分为 2 份,其中包含胶体磷和真溶解磷;取 1 份滤液于 30 000 r/min 下超速离心 2 h,胶体磷沉降于离心管底部,上清液为真溶解磷;未超速离心的滤液磷浓度减去等体积的超速离心的滤液磷浓度,即为水样中胶体磷的浓度。胶体 Fe、胶体 Al 和胶体 TOC 浓度均为离心前后溶液的浓度之差,电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP—AES,6300,Thermo Scientific,美国)测定样品中的总 Fe、Al、TOC 采用总炭总氮分析仪(Multi N/C 3100,德国)测定。MRP 是液体样品在未消解的情况下直接与钼酸盐反应比色后测的磷浓度,而 MUP 浓度则是各形态(溶解和胶体)的总磷减去等体积测定下的 MRP 浓度。所有试验器皿均以硝酸(10%)浸泡后去离子水洗涤 3 次。所有分析设置 3 次平行。

数据处理:多元线性回归采用分析软件 SPSS 22,作图软件为 Origin。

表 1 采样监测的降雨事件

降雨时间 (年-月-日)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	降雨强度/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	雨水 pH
2017-04-02	9	23	5.12
2017-05-03	18	32	5.25
2017-05-17	19	9	4.68
2017-06-15	20	36	4.88
2017-06-25	25	48	4.23
2017-08-02	26	8	5.01
2017-08-09	25	49	5.91
2017-08-16	26	19	5.82
2017-09-11	25	23	5.01

2 结果与分析

2.1 稻田产流过程中胶体磷流失贡献

从图 1a 可以看出,1 次典型暴雨历程中田面水各粒级磷素浓度的变化中,颗粒磷、胶体磷和真溶解磷流失贡献范围分别为 67%~89%,5%~22%和 6%~21%。在降雨历程 5 min 左右,田面水中总磷浓度达 1.6 mg/L,随后迅速下降,在 45 min 左右趋于平稳,最终浓度为 0.13 mg/L。颗粒磷浓度变化趋势与总磷吻合,在降雨历程 20 min 占总磷含量的 89%,是田面水中磷素的主要形态。胶体磷和真溶解磷的变化趋势相似,在降雨历程 20 min 内快速下降后趋于平稳。导致磷素浓度下降的主要原因为降雨径流中的泥沙对磷素具有富集迁移作用^[21],且降雨

产沙量在降雨历程中不断变小,所以磷素流失主要输出时间为降雨径流过程前期^[22]。

从图 1b 可以看出,1 次典型暴雨历程中稻田排水各粒级磷素浓度的变化中,稻田排水中颗粒磷、胶体磷和真溶解磷流失贡献范围分别为 50%~81%,7%~15%和 9%~39%。与田面水明显不同,稻田排水中各粒级磷浓度在降雨发生后 15 min 达到峰值,这主要是因为降雨事件发生前,稻田排水的通道中已有大量低磷浓度存水,导致初期田面水流失的磷素汇入无法在短时间内造成稻田排水中磷素浓度的快速上升,且降雨初期磷素浓度峰值的稻田径流运动到稻田排水通道需要一定时间。此外,在降雨历程后期,各粒级磷素浓度皆出现小幅度上升,这缘于降雨后期,大量的低磷浓度的雨水和田面水汇入排水沟,增加了排水沟底泥高磷浓度的间隙水与上覆水间的浓度差,进而向上覆水中释放磷素,而间隙水中磷浓度在以往学者的研究^[23]中为上覆水的 6.5 倍。

从图 2a 和图 2b 可以看出,田面水和稻田排水中胶体磷和真溶解磷在过 1 μm 滤膜后总磷中的流失贡献,田面水和稻田排水中胶体磷的流失贡献范围分别为 26%~73%和 21%~50%。由图 2a 可知,田面水中胶体磷的流失贡献在降雨历程中不断升高,在 45 min 左右达到峰值(73%),超过了真溶解磷的贡献比例,随后快速下降并稳定在 40%左右。稻田排水中胶体磷流失贡献与田面水中变化规律相似,呈先上升后下降的趋势,但其贡献峰值(50%)出现在 30 min 左右,且最终稳定在 20%左右,仅为田面水中的 1/2。造成这一现象的原因主要是,胶体磷在降雨进行过程中,雨水在田面水和稻田排水径流中所占比例越来越大,这必将导致径流中 pH 的不断降低,而在酸性条件下,大颗粒胶体之间或土壤团聚体内部的无机矿物胶膜会被溶解^[18],促进胶体磷流失;此外,田面水径流中大颗粒胶体或土壤颗粒在汇集到稻田排水通道的过程中受水稻拦截等植株拦截等发生沉降,导致胶体磷的转化源减少。综合来看,田面水和稻田排水中磷素流失形式以颗粒磷为主。在过 1 μm 滤膜的总磷中,胶体磷的流失贡献为 21%~73%,甚至会超真过溶解磷的流失贡献,而胶体的重力在水体中会被布朗运动所抵消,长期呈悬浮态,可协助磷素运输到更远的水体中^[24]。

2.2 田面水和稻田排水径流中真溶解磷流失贡献

从图 3 可以看出,8 次降雨事件后田面水和稻田排水径流中真溶解磷的流失贡献。以第 2 次施肥时间作为起点,田面水和稻田排水中真溶解磷浓度整体

呈下降趋势,田面水的浓度甚至出现陡降;除 6 月 15 日的降雨事件田面水的真溶解磷浓度(0.30 mg/L)远高于稻田排水(0.12 mg/L),田面水中真溶解磷浓度整体低于稻田排水。径流的真溶解磷主要来源于施肥,而距离施肥时间越远,可供流失的真溶解磷量越少,这正好可以解释径流的真溶解磷在施肥后呈下降趋势的现象。然而,稻田排水径流中的磷素来源除田面水中的磷素外,还包括沟渠底泥和间隙水中的磷素,尤其在降雨后期,大量低浓度径流汇入排水沟后,在底泥间隙水与上覆水磷浓度差的胁迫下稻田排水中的真溶解磷流失贡献升高^[23],沟渠底泥也会向沟

渠间隙水中释放磷素。6 月 10 日的施肥事件后的 6 月 15 日的田面水中,真溶解磷浓度在施肥后猛增,导致其流失贡献增加。同时 5 月 17 日的真溶解磷浓度较上一次增大,这主要是因为此次降雨量较小,对田面土壤造成一定的扰动,但降雨径流还未达到排放需求,随降雨径流中磷浓度有所升高,而 5 月 3 日的降雨强度较大,降雨初期高磷浓度的径流在降雨过程中大量流失。由此得知,降雨和施肥时间是造成磷素流失的主要原因^[25],且真溶解磷可被藻类直接利用,其大量流失造成的环境风险极大,因此合理地选择施肥时间,避开降雨集中的月份。

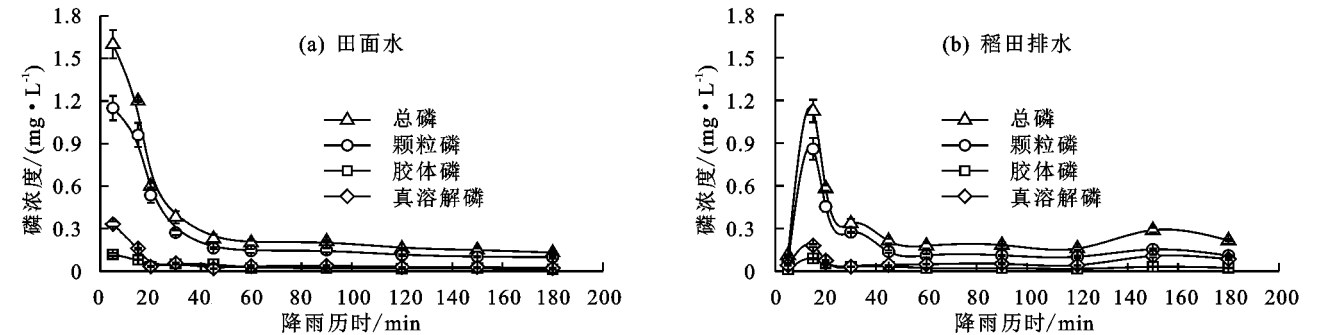


图 1 田面水与稻田排水在降雨历程中各粒级磷素浓度

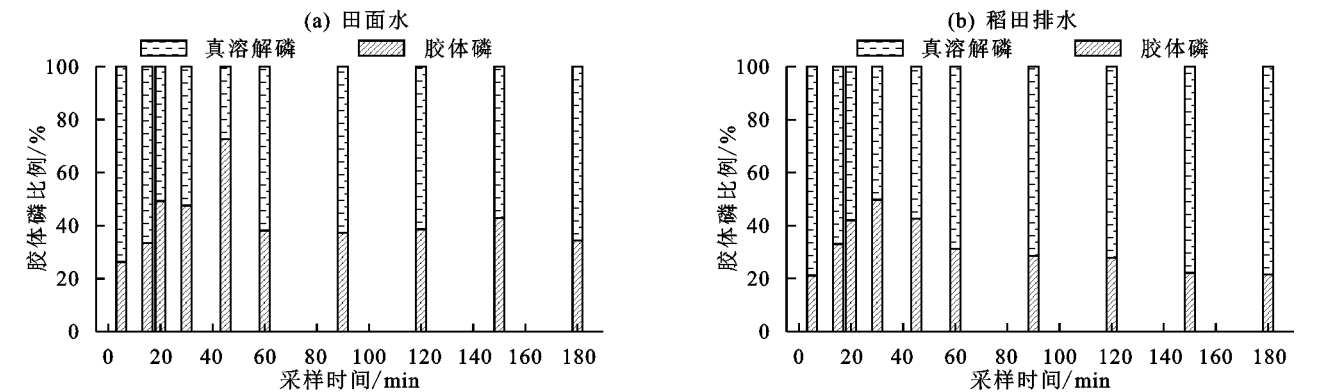


图 2 降雨历程田面水与稻田排水中胶体磷和真溶解磷流失贡献

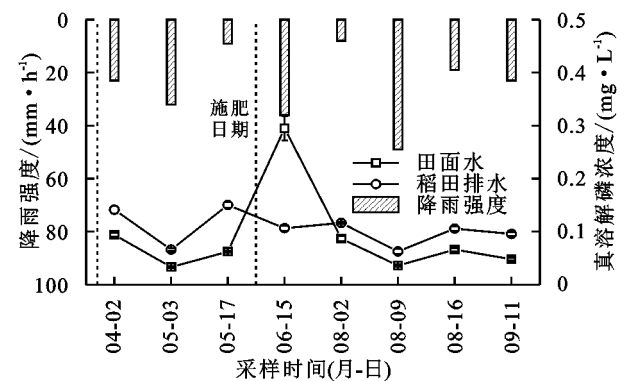


图 3 不同降雨事件下田面水与稻田排水中真溶解磷浓度

2.3 田面水和稻田排水径流中胶体磷的赋存形态分析

土壤胶体磷在降雨和施肥的影响下活化迁移进入田面水和稻田排水中的胶体磷大致可以分为有机胶体结合磷而构成的微小胶体磷(<25 nm)、有机质—金属(铁铝)胶体结合磷而构成的细小尺寸胶体

磷(25~240 nm)和金属氧化物(铁、铝、硅)或黏土矿物胶体结合磷而构成的中等尺寸胶体磷(240~500 nm)3 个等级^[26]。一般认为,在钙质土壤中,胶体磷赋存形态以钙质胶体结合磷为主,在铁铝含量或黏土矿物含量较高土壤中,胶体磷赋存形态以金属氧化物或黏土矿物胶体结合磷为主^[27],而在有机质含量较高的土壤,如森林土壤,有机质胶体结合磷也会占据主导地位^[28]。表 2 为胶体磷、胶体 MRP、胶体 MUP 浓度与浊度、COD、pH、胶体 Fe、胶体 Al、胶体 TOC 之间的皮尔森相关系数。其中,胶体磷、胶体 MRP、胶体 MUP 浓度皆与浊度存在正相关关系,这与 Heathwaite 等^[29]的研究结果较为吻合,该学者采用氯化钙提取土壤溶液来模拟降雨对土壤的扰动,研究发现水提取液的浊度与胶体磷浓度具有极显著的正

相关性($R^2=0.86, p<0.001$), 相比之下, 本试验的相关性较弱, 主要原因在于此次试验为自然条件下采样, 不可控变量因素影响较大, 如采样时间延迟、水稻田水稻和沟渠中水生植物的水力拦截等。

从表 2 还可看出, 胶体磷、胶体 MRP、胶体 MUP 浓度还与胶体 TOC、胶体 Fe、胶体 Al 之间存在正相关关系, 且与胶体有机质的相关性高于胶体 Fe 和胶体 Al, 首先说明金属氧化物胶体、有机质胶体结合磷为径流中的胶体磷的重要赋存形态^[27], Regelink 等^[30]采用超滤和 ICP—MS 来分析农田排水中的胶体物, 同样发现胶体磷流失贡献与排水中金属胶体具

表 2 田面水与稻田排水中胶体磷与水样其他性质的相关性

项目		胶体总磷	胶体 MRP	胶体 MUP	浊度	COD	pH	胶体 Fe	胶体 Al	胶体 TOC
胶体总磷	田面水	1	0.972**	0.952**	0.665	0.591	0.317	0.544	0.635	0.781*
	稻田排水	1	0.964**	0.952**	0.690	0.698	0.597	0.734*	0.350	0.747*
胶体 MRP	田面水	0.972**	1	0.854**	0.562	0.526	0.147	0.527	0.612	0.765*
	稻田排水	0.964**	1	0.836**	0.561	0.584	0.501	0.762*	0.566	0.653
胶体 MUP	田面水	0.952**	0.854**	1	0.742*	0.625	0.511	0.521	0.612	0.737*
	稻田排水	0.952**	0.836**	1	0.776*	0.767*	0.654	0.636	0.072	0.788*

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关。

2.4 田面水和稻田排水径流中胶体磷流失贡献和流失规律

从图 4a 和图 4b 可以看出, 田面水中胶体磷的流失贡献范围为 9%~44%, 稻田排水的胶体磷流失贡献范围为 10%~16%。距离施肥事件较近的田面水与稻田排水径流中胶体磷流失贡献小, 如田面水在 4 月 2 日和 6 月 15 日时的流失贡献为 14% 和 9%, 而距离远的径流中胶体磷流失贡献又变大。这主要是因为施肥增加田面水中的离子强度, 压缩胶体磷表面的双电层, 进而导致田面水和稻田排水中的胶体磷的短程力变小, 范德华力作用增大, 促使胶体磷发生凝聚作用, 形成较大粒径的颗粒, 最终在重力作用下沉降而减少流失。此外, 施肥是影响土壤电导率的主要因素^[33], 施肥会导致土壤电导率的升高, 而在以往的研究中被证明, 电导率与胶体磷流失贡献呈负相关关系, 这也从侧面解释了施肥降低胶体磷的流失贡献。另外, 稻田排水中胶体磷流失贡献的变化趋势尽管与田面水一致, 但是其波动幅度较小(田面水变异系数为 0.53, 稻田排水变异系数为 0.18), 这可能是由田面水在运输过程中径流离子强度降低, 进而导致施肥对胶体磷流失贡献的影响减弱。

从图 5 可以看出, 田面水中胶体磷浓度与降雨强度之间的相关性较低, 其线性回归系数 R^2 为 0.75, 但与田面水不同, 稻田排水中胶体磷的浓度与降雨强度

有正向相关性; 还有学者^[31]发现, 土壤溶液中铁铝金属、磷含量与有机碳具有显著正相关性, 这主要是因为腐殖质、金属和真溶解磷会通过络合反应和吸附架桥作用生成腐殖质—Al(Fe)—正磷酸盐, 即胶体磷, 是土壤胶体磷流失的重要赋存形态, 还有学者^[26]对森林土壤剖面胶体磷监测时发现, 土壤表层中, 胶体磷的主要形式为有机质胶体磷, 这主要是由于森林土壤本身由于多年有机质积累所致。本试验区为多年免耕土壤, 而在以往的研究中免耕会显著增加土壤中有机质的含量已经被证实^[32], 这正好可以解释胶体 TOC 的相关性高于胶体 Fe 和胶体 Al。

具有较好的相关关系($R^2=0.749\ 3$)。直观来看, 降雨事件下土壤细小颗粒(胶体)流失的原因主要为雨水的冲刷, 但在前人^[34]的研究中, 发现雨水对土壤颗粒的打击力最大不超过 0.3 MPa, 而土壤胶体间的范德华引力和静电排斥力一般为几十 MPa, 而水合力为几百甚至上千 MPa, 雨水的打击力与胶体间的作用力完全不在一个数量级上。因此, 降雨冲刷不是造成土壤胶体磷分散的原因, Li 等^[34]的试验发现, 在降雨期间, 高表面电荷密度下($<-100\text{ Mv}$), 即使降雨强度达到 150 mm/h, 土壤微小颗粒流失量依然较小。间接说明施肥可以通过增加胶体表面电荷密度增加土壤胶体磷的稳定性, 进而减少胶体磷的流失。尽管降雨不会通过冲刷效应增加胶体磷的流失贡献, 但雨水带来的氢离子会促进胶体磷的活化迁移^[18]。降雨强度越大, 酸性雨水汇入量越多, 尤其在降雨强度较大时, 降雨事件后径流水体构成中酸性雨水占比极大, 这必然会导致径流的 pH 下降, 进而溶解径流中土壤颗粒间的金属氧化物胶膜, 促进胶体磷的释放, 表 2 中胶体 Fe 和胶体 Al 浓度与胶体磷浓度的正向相关性也可证明此规律。此外, 在牛彧文等^[35]进行的杭州市多年酸雨特征调查中, 发现杭州酸雨 pH 年平均值为 4.0~5.0, 本研究区域位于在杭州市余杭区, 如表 1 中显示的降雨监测 pH 与该调查结果类似。另外, 降雨强度越大, 对稻田表层土壤的冲刷效应越强^[36], 尽管冲刷效

应不会直接增加胶体磷流失贡献,但会增加径流中可被

溶解的大颗粒磷。

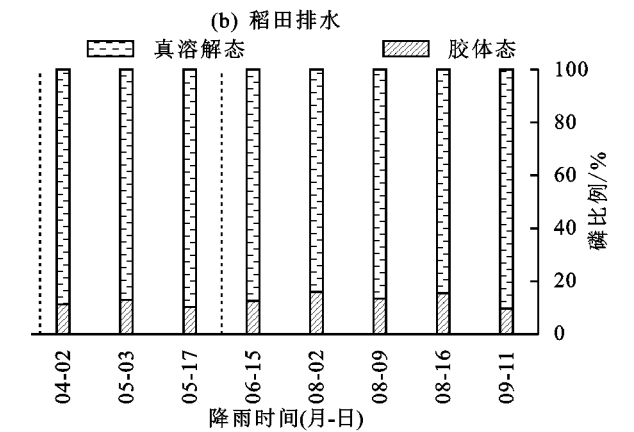
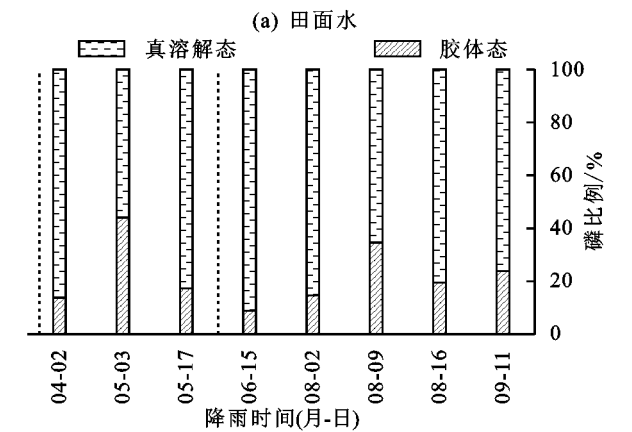


图 4 不同降雨事件下田面水与稻田排水中真溶解磷和胶体磷比例

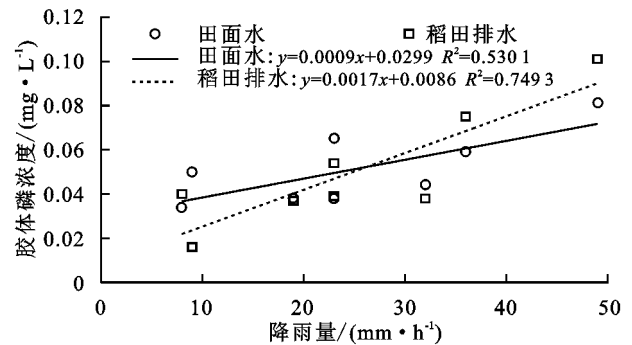


图 5 不同降雨事件下胶体磷浓度变化

3 结论

(1)降雨历程中田面水和稻田排水中磷素流失形式以颗粒磷为主。在过 1 μm 滤膜的总磷中,胶体磷的流失贡献为 21%~73%,甚至超过溶解磷的流失贡献。

(2)降雨后田面水中胶体磷的贡献范围为 9%~44%,稻田排水中胶体磷流失贡献范围为 10%~16%。金属氧化物胶体、有机质胶体以及金属氧化物—有机质胶体为径流中的胶体磷的重要赋存形态。

(3)降雨和施肥对径流中的胶体磷流失贡献的影响不同,施肥通过影响土壤导电率和径流中的离子强度来抑制胶体磷的流失贡献,就影响程度来看,田面水大于稻田排水,主要是因为稻田排水中在运输过程中受雨水稀释,离子强度降低;而降雨通过降低径流中的 pH 来增加胶体磷的流失贡献,就影响程度来看,稻田排水大于田面水,这主要源于施肥和降雨的共同影响。

参考文献:

[1] 杨育红, 阎百兴. 降雨—土壤—径流系统中氮磷的迁移[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 27-30.

[2] Christoff V M, Laetitia S, Fien D, et al. Effect of organic P forms and P present in inorganic colloids on the determination of dissolved P in environmental samples by the diffusive gradient in thin films technique, ion chromatography, and colorimetry[J]. Analytical Chem-

istry, 2011, 83(13): 5317-5323.

[3] 孙小静, 张战平, 朱广伟, 等. 太湖水体中胶体磷含量初探[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 231-237.

[4] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 13-17.

[5] Moorlegheem V, Christoff, Schutter D, et al. The bio-availability of colloidal and dissolved organic phosphorus to the; alga *Pseudokirchneriella subcapitata* in relation to analytical; phosphorus measurements[J]. Hydrobiologia, 2013, 709(1): 41-53.

[6] Montavo D, Degryse F, Mclaughlin M J. Natural colloidal P and its contribution to plant P uptake[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(6): 3427-3434.

[7] Carpita N, Sabularse D, Montezinos D, et al. Determination of the pore size of cell walls of living plant cells[J]. Science, 1979, 205(4411): 1144-1147.

[8] Zemke-White W L, Clements K D, Harris P J. Acid lysis of macroalgae by marine herbivorous fishes: Effects of acid pH on cell wall porosity[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 245(1): 57-68.

[9] 周理斌, 林良师, 柳欣, 等. 两种甲藻对人工海水中胶体磷的利用初探[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(1): 95-101.

[10] Liu J, Liang X Q, Yang J J, et al. Size distribution and composition of phosphorus in the East Tiao River, China: The significant role of colloids[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(10): 2844-2850.

[11] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 792-799.

[12] Xu C Y, Yu Z H, Li H. The coupling effects of electric field and clay mineralogy on clay aggregate stability[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(5): 1159-1168.

[13] 姚毓菲, 朱华玲, 张丽华, 等. 电解质对土壤水土迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 44-48.

- [14] Yu C R, Muñoz-Carpena R, Gao B, et al. Effects of ionic strength, particle size, flow rate, and vegetation type on colloid transport through a dense vegetation saturated soil system: Experiments and modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 499: 316-323.
- [15] Zhuang J, Goeppert N, Tu C, et al. Colloid transport with wetting fronts: Interactive effects of solution surface tension and ionic strength[J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1270-1278.
- [16] Koopmans G F, Chardon W J, van der Salm C. Disturbance of water-extractable phosphorus determination by colloidal particles in a heavy clay soil from the Netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(34): 1446-1450.
- [17] Zhang M K. Effects of soil properties on phosphorus subsurface migration in sandy soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(5): 599-610.
- [18] Liang X Q, Jin L, Chen Y X, et al. Effect of pH on the release of soil colloidal phosphorus[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(8): 1548-1556.
- [19] Hens M, Merckx R. The role of colloidal particles in the speciation and analysis of “dissolved” phosphorus[J]. *Water Research*, 2002, 36(6): 1483-1492.
- [20] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [21] 郭智,肖敏,陈留根,等.稻田径流侵蚀泥沙对磷素流失的影响[J].*水土保持学报*, 2010, 24(5): 63-67.
- [22] 冯国禄,龚军慧.人工降雨对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J].*水土保持学报*, 2011, 25(2): 130-133.
- [23] 王晓玲,郑晓通,李松敏,等.农田排水沟渠底泥—间隙水—上覆水氮磷迁移转化规律研究[J].*水利学报*, 2017, 48(12): 1410-1418.
- [24] Siemens J, Ilg K, Pagel H, et al. Is colloid-facilitated phosphorus leaching triggered by phosphorus accumulation in sandy soils? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2100-2107.
- [25] Fonseca C R, Collins B, Westoby M. Shifts in trait-combinations along rainfall and phosphorus gradients[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 88(6): 964-977.
- [26] Missong A, Bol R, Nischwitz V, et al. Phosphorus in water dispersible-colloids of forest soil profiles[J]. *Plant and Soil*, 2018, 427(1/2): 71-86.
- [27] Liang X Q, Jin Y, Yue Z, et al. Release and migration of colloidal phosphorus from a typical agricultural field under long-term phosphorus fertilization in southeastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 842-853.
- [28] Missong A, Holzmann S, Bol R, et al. Leaching of natural colloids from forest topsoils and their relevance for phosphorus mobility[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 305-315.
- [29] Heathwaite L, Haygarth P, Matthews R, et al. Evaluating colloidal phosphorus delivery to surface waters from diffuse agricultural sources[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(1): 287-298.
- [30] Regelink I C, Koopmans G F, van der Salm C, et al. Characterization of colloidal phosphorus species in drainage waters from a clay soil using asymmetric flow field-flow fractionation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(2): 464-473.
- [31] Gerke J. Humic (organic matter)-Al(Fe)-phosphate complexes: An underestimated phosphate form in soils and source of plant-available phosphate[J]. *Soil Science*, 2010, 175(9): 417-425.
- [32] 薛斌,黄丽,鲁剑巍,等.连续秸秆还田和免耕对土壤团聚体及有机碳的影响[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1): 182-189.
- [33] 王晶,杨联安,杨煜岑,等.西安市蔬菜种植区土壤属性的空间变异与肥力适宜性[J].*水土保持通报*, 2017, 37(3): 204-209.
- [34] Li S, Li H, Xu C Y, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1563-1571.
- [35] 牛彧文,浦静姣,邓芳萍,等.1992—2012年浙江省酸雨变化特征及成因分析[J].*中国环境监测*, 2017, 33(6): 55-62.
- [36] 陈晓燕,王茹,卓素娟,等.不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J].*水土保持学报*, 2012, 26(6): 1-6.