

宁建凤, 姚建武, 艾绍英, 等. 广东典型稻田系统磷素径流流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 257-268.

NING Jian-feng, YAO Jian-wu, AI Shao-ying, et al. Characteristics of Phosphorus Runoff Losses from Typical Paddy Fields in Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 257-268.

## 广东典型稻田系统磷素径流流失特征

宁建凤, 姚建武, 艾绍英\*, 李盟军, 余丹妮, 王思源, 罗英健

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室/广东省农业面源污染监测评估与防控工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:**选择位于广东省增城、清远和高州地区的3个稻田试验点,于2008—2012年对稻田磷径流损失进行动态监测。结果表明,稻田径流事件主要发生在早稻季。常规施肥模式下稻田总磷径流浓度为 $0.02\sim 1.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,11%~18%的径流样品总磷浓度超过地表水V类水标准( $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),施磷后14 d内降雨易导致稻田不同形态磷浓度出现峰值,具有一定环境污染风险。施磷不同程度增加稻田可溶性总磷径流负荷,对颗粒磷和总磷流失负荷无规律性影响。稻田磷径流负荷时空变化较大,常规施肥条件下可溶性总磷、颗粒磷、总磷年径流负荷分别为 $0.63\sim 4.05$ 、 $0.33\sim 2.91$ 、 $1.10\sim 6.68\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本地区稻田磷流失系数为0.06%~6.81%,可溶性总磷是稻田磷径流流失主要形态。施肥量和降雨、径流量是影响本地区稻田磷径流损失的主要因子。

**关键词:**稻田;可溶性总磷;颗粒磷;径流流失;广东

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)03-0257-12

doi: 10.13254/j.jare.2017.0308

### Characteristics of Phosphorus Runoff Losses from Typical Paddy Fields in Guangdong Province, China

NING Jian-feng, YAO Jian-wu, AI Shao-ying\*, LI Meng-jun, YU Dan-ni, WANG Si-yuan, LUO Ying-jian

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangdong Engineering Research Center for Monitoring and Prevention of Agricultural Non-point Source Pollution, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Three experimental paddy fields located in the city of Zengcheng, Qingyuan and Gaozhou in Guangdong Province were selected to monitor the runoff losses of phosphorus from the year of 2008 to 2012. The results showed that runoff event in paddy field occurred mainly in the early rice season. The runoff concentration of total phosphorus (TP) under conventional fertilization treatment was in the range of  $0.02\sim 1.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . It was recorded that TP concentration in 11%~18% of the total runoff samples exceeded the grade V of the national surface water environmental quality ( $0.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Peak concentration of different phosphorus forms [TP, dissolved total P (DTP) and particulate P (PP)] were observed within 14 days after fertilization, which indicated the high environmental pollution risk of phosphorus during this period. Application of phosphorus fertilizer increased runoff load of DTP in paddy field and showed no effect on that of PP and TP. The annual runoff loads of  $0.63\sim 4.05$ ,  $0.33\sim 2.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $1.10\sim 6.68\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  for DTP, PP and TP, respectively, were recorded under conventional fertilizer model. Runoff load of phosphorus exhibited wide spatial and temporal variation during experimental period. Runoff coefficient of 0.06%~6.81% of phosphorus was recorded. It was observed that DTP dominated the phosphorus runoff load. Phosphorus runoff losses from paddy field was affected by a variety of natural and human factors, and fertilization, precipitation and runoff volume were identified as the main factors.

**Keywords:** paddy field; dissolved total phosphorus; particulate phosphorus; runoff loss; Guangdong Province

磷是植物生长发育必需营养元素之一。长期以来,磷肥在提高作物产量、保障粮食安全方面发挥了

重要作用。然而,磷肥不合理施用导致的水环境面源污染问题在世界范围内普遍存在<sup>[1]</sup>。据报道,水体中可

收稿日期:2017-12-06 录用日期:2018-03-21

基金项目:广东省科技计划项目(2010B030800009,2014B020206001,2016B070701009);广东省应用型科技研发专项资金项目(2016B020240009)

作者简介:宁建凤(1978—),女,河北邯郸人,博士,副研究员,主要从事农田氮磷养分循环与面源污染控制研究。E-mail: jianfengning@gdaas.cn

\*通信作者:艾绍英 E-mail: shaoyingai@21cn.com

溶性磷含量达到  $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  就有可能引发湖泊、水库等水体富营养化<sup>[2]</sup>。我国第一次全国污染源普查公报显示,种植业总磷流失量达 10.87 万 t,占农业源(不含农村生活源)总磷流失总量(28.47 万 t)的 38%<sup>[3]</sup>。针对滇池流域的研究表明,2008 年滇池流域种植业总磷排放量达 64.8 t,占该流域总磷排放总量的 11.9%<sup>[4]</sup>。刘晓南等<sup>[5]</sup>估算广州流溪河流域种植业系统颗粒态磷年流失量达 424.74 t,旱地和水田贡献率分别为 28.75%和 26.94%。农田磷素流失受土壤侵蚀度、地形、地表覆盖、区域耕作措施、施肥等多种因素影响<sup>[6]</sup>。

广东地处南亚热带季风气候区,充足的水、热资源条件有利于水稻周年生产,是我国传统的水稻生产区之一。广东地区水稻通常种植两季,即 3—7 月的早稻和 8—11 月的晚稻。据统计,2015 年广东省水稻播种面积 4.24 万  $\text{hm}^2$ ,稻谷产量 1 088.42 万 t,稻谷单位产量相比 1978 年提高了 67.6%<sup>[7]</sup>。长期以来,我国稻谷单产的大幅提升有赖于化肥的大量投入<sup>[8]</sup>。广东省每季水稻磷肥(以  $\text{P}_2\text{O}_5$  计,下同)用量  $38.1 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[9]</sup>,经济发达的珠江三角洲地区稻田磷用量相对高于省内其他地区,如增城、南海、惠阳、东莞稻田磷肥年投入量分别达到 196.8、208.8、198  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 232.8  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[10]</sup>。曾招兵等<sup>[11]</sup>研究表明,1984—2013 年间,广东全省耕地土壤有效磷含量总体水平增长了近 3 倍,年平均增加  $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全省 34.4%耕地由于磷累积而对周围环境具有潜在污染风险。

基于广东省稻田土壤磷素盈余现状,加之本地区降雨量大、降雨强度高的自然环境特征,本研究开展稻田磷素径流流失监测,明确区域常规耕作模式下稻田土壤不同形态磷径流浓度、流失负荷及流失系数等径流特征,以为广东地区水稻磷养分优化管理及面源污染防治提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验在广东省内实施,共设置 3 个试验点,分别

为清远试验点( $112^\circ 56' 38'' \text{E}$ ,  $24^\circ 20' 55.2'' \text{N}$ )、增城试验点( $113^\circ 51' 25'' \text{E}$ ,  $23^\circ 22' 26'' \text{N}$ )和高州试验点( $110^\circ 46' 31.6'' \text{E}$ ,  $21^\circ 47' 18.5'' \text{N}$ )。2008—2012 年对 3 个试验点持续开展了 5 年的监测研究。3 个试验点所在地气候均属亚热带季风气候,清远、增城和高州年均气温分别为 20.3、21.8  $^\circ \text{C}$  和 22.8  $^\circ \text{C}$ ,年均降雨量分别为 1 876、1 922 mm 和 1 893 mm,80%降雨量均集中在 4—9 月份<sup>[12]</sup>。3 个试验点供试稻田土壤均为赤红壤,肥力水平中等。土壤(0~20 cm)基本理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

试验依照第一次全国污染源普查种植业源肥料产排污系数测算实施方案,设对照(CK)和习惯施肥(CF)两个处理,每处理 3 次重复,随机排列。其中,对照处理不施任何肥料,农户习惯施肥处理通常采用复合肥,肥料用量及施用方法均按照当地农户习惯模式进行,即在水稻移栽前 1~2 d 施 1 次基肥,7~10 d 进行第一次追肥,20~35 d 内进行第二次追肥。不同试验点早稻、晚稻追肥时间基本相同。早稻和晚稻肥料投入量如表 2 所示。不同年份或同一年份不同种植季农户采用的肥料品种有所差异,导致水稻氮磷钾养分投入量变幅较大。

试验点田间小区面积  $24 \text{ m}^2$ ( $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ),不同试验点小区规格相同。每个小区四周埋设塑料薄膜以防降雨时水分侧向流动,同时每小区末端预埋设一条 PVC 排水管,用于将降雨产生的径流水导入径流池(长 3 m,宽 1 m,深 1 m)。每次降雨产生径流后,测定径流池中径流液体积,采集径流水样带回实验室分析。

试验期间,通过安装在田间的雨量计测量降雨量,并采集雨水样品进行分析。每次采集径流液后清洗干净径流池,便于下次径流液收集。稻田灌溉、水稻喷药、田间除草等管理措施均按照农户习惯模式进行。一年内种植两季水稻,其中早稻生育期为 4—7 月,晚稻生育期为 8—11 月。

### 1.3 样品分析及指标计算方法

径流液总磷(TP)和可溶性总磷(DTP)均参照《水和废水监测分析方法》<sup>[13]</sup>进行测定。其中,总磷浓度采

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the soil in the experimental fields

试验点 Experimental site	pH	有机质 Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 Olsen P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
增城 Zengcheng	6.20	22.8	1.28	0.47	5.09	2.59	23.80
清远 Qingyuan	6.40	24.2	1.39	0.82	3.45	11.31	12.50
高州 Gaozhou	5.60	21.5	1.08	0.43	3.33	0.40	25.00

表2 试验点水稻年施肥量(kg·hm<sup>-2</sup>)  
Table 2 Annual inputs of chemical fertilizers in rice production(kg·hm<sup>-2</sup>)

试验点 Experimental site	肥料 Fertilizer	2008		2009		2010		2011		2012	
		早稻 Early rice	晚稻 Late rice								
增城 Zengcheng	N	107	122	168	113	192	114	68	68	143	142
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	36	30	29	20	19	45	16	34	41	49
	K <sub>2</sub> O	29	93	78	61	19	45	43	34	89	115
清远 Qingyuan	N	223	268	151	165	207	195	143	143	231	254
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	78	172	87	127	160	166	56	56	88	82
	K <sub>2</sub> O	165	172	56	127	160	166	56	56	44	183
高州 Gaozhou	N	156	139	107	115	242	175	181	208	91	72
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	71	26	27	72	72	49	133	71	26	27
	K <sub>2</sub> O	0	47	60	51	96	94	133	188	71	60

用过硫酸钾消化-钼锑抗比色法,可溶性总磷浓度测定时用0.45 μm滤膜过滤径流液后采用过硫酸钾消化-钼锑抗比色法测定,颗粒磷(PP)浓度由总磷减去可溶性总磷浓度获得。

磷径流负荷(kg·hm<sup>-2</sup>)=[径流磷浓度(mg·L<sup>-1</sup>)×径流水体积(L)/10<sup>6</sup>]/小区面积(hm<sup>2</sup>)。

磷流失系数=(施磷处理磷流失负荷-不施肥处理磷流失负荷)/施磷量×100%

径流系数=径流量/降雨量×100%

### 1.4 数据分析

使用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据处理和主成分分析。数据标准化处理采用标准差标准化进行<sup>[14]</sup>,如式(1):

$$P_{mj} = \frac{X_{mj} - X_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

式(1)中:P<sub>mj</sub>代表标准化后的指标值;X<sub>mj</sub>代表原始指标值;X<sub>j</sub>代表j个指标的算术平均值;σ<sub>j</sub>代表样本标准偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田产流特征

不同试验点稻田降雨量、径流量年际变化较大(图1A)。增城、清远和高州试验点年降雨量分别为1 017~1 979、998~1 652 mm和1 210~2 831 mm,径流量分别为529~1 599、441~912 mm和576~2 292 mm,其中早稻季径流量占全年径流量比例分别为59%~82%、75%~94%和65%~73%(2009年除外)。增城试验点稻田径流系数在52.0%~80.8%之间,清远和高州试验点径流系数分别为54.0%~65.2%和47.6%~81.0%(图1B)。总体上,各试验点稻田径流量与相应

降雨量之间呈现相似的年际消长变化特征,且两者之间的正相关关系达到极显著水平(P<0.01,图2)。

经统计,增城、清远和高州试验点2008—2012年早稻季分别采集径流水样54、39次和51次,晚稻季采集径流水样10、14次和16次。径流水样品采集次数与早稻季径流量分布规律一致,说明早稻季是广东地区稻田径流的主要发生季。

### 2.2 稻田可溶性总磷径流浓度

增城(图3A)、清远(图3B)和高州(图3C)试验点对照(CK)处理可溶性总磷径流浓度分别为0.01~0.14、0.01~0.30、0.02~0.28 mg·L<sup>-1</sup>,施肥不同程度增加稻田径流水可溶性总磷浓度,3个试验点常规施肥(CF)处理可溶性总磷径流浓度分别为0.01~0.55、0.01~0.52、0.03~1.56 mg·L<sup>-1</sup>,说明可溶性总磷径流浓度在不同年份间变幅较大,这与稻田降雨量、年施肥量及施肥与降雨时间间隔等多种因素有关。从图3也可以看出,施肥后短期内降雨容易导致径流水可溶性总磷浓度出现峰值,3个试验点稻田可溶性总磷浓度峰值距离最近一次施磷时间0~14 d。由于稻田径流事件主要发生于早稻季,晚稻季径流水样品较少(平均3次),总体上各试验点早稻季可溶性总磷径流浓度变幅较大,晚稻季可溶性总磷径流浓度基本处于早稻季浓度变化范围内。

### 2.3 稻田颗粒磷径流浓度

稻田颗粒磷径流浓度变化如图4所示。增城试验点(图4A)对照和常规施肥处理分别有5次和7次径流水样品中可溶性总磷浓度占总磷浓度比例接近100%,导致颗粒磷浓度可忽略不计。清远试验点(图4B)对照和常规施肥处理稻田径流水颗粒磷浓度均低于0.6 mg·L<sup>-1</sup>。高州试验点(图4C)对照和常规施

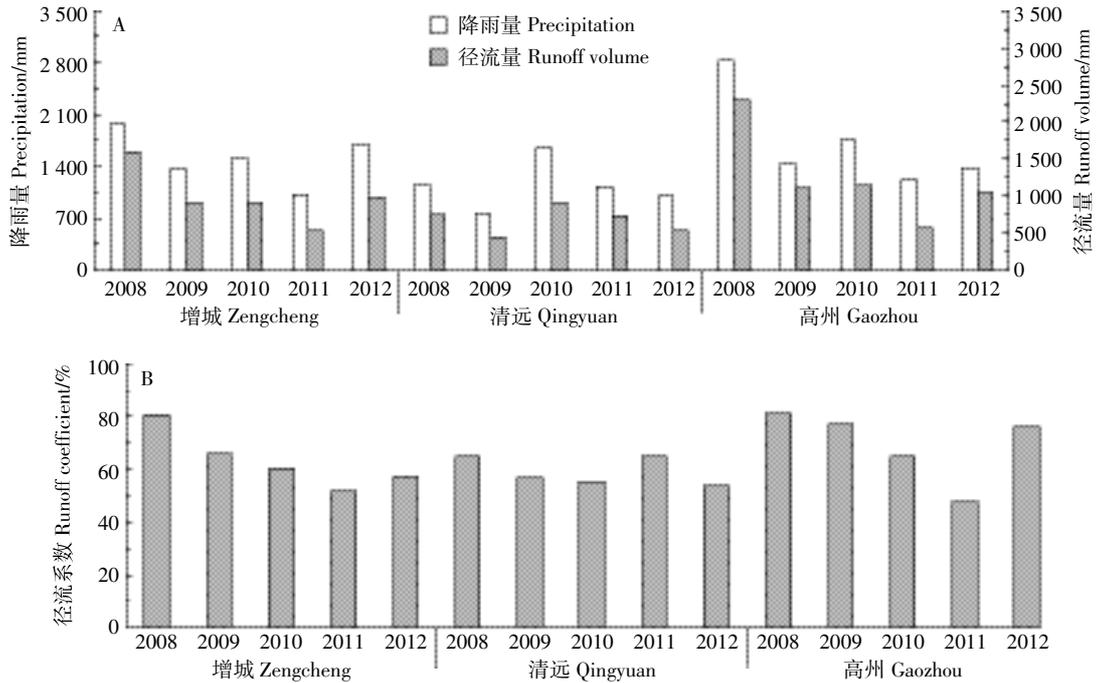


图 1 不同试验点稻田降雨量、径流量(A)及径流系数(B)

Figure 1 Precipitation, runoff volume(A) and runoff coefficient(B) in different paddy field sites

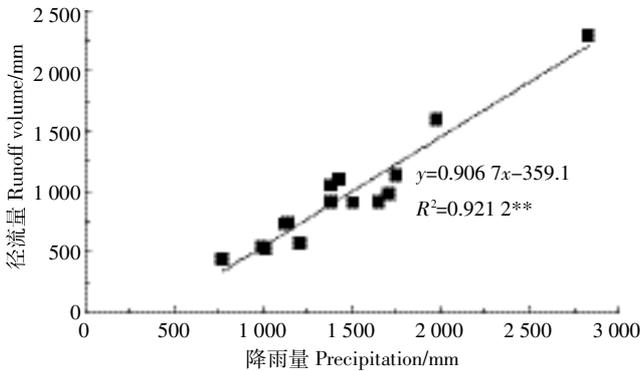


图 2 稻田降雨量和径流量相关关系

Figure 2 Correlation between precipitation and runoff volume in different paddy field sites

肥处理分别有 1 次和 4 次径流水样品可溶性总磷占总磷浓度比例接近 100%，主要由于持续降雨导致稻田田面水增加，减少降雨对稻田表层土壤的冲击，降低了径流水颗粒磷流失，颗粒磷浓度可忽略不计。各试验点其余样品 CK 处理颗粒磷浓度为 0.01~1.26 mg·L<sup>-1</sup>，常规施肥 CF 处理颗粒磷浓度年际变化较大，在 0.01~1.37 mg·L<sup>-1</sup> 之间。相比对照，施肥对该试验点稻田径流水颗粒磷浓度无规律性影响，施肥后 1~13 d 内降雨可观察到稻田径流水颗粒磷浓度峰值。各试验点晚稻季颗粒磷径流浓度变幅较小，总体处于相应早稻季颗粒磷浓度范围内。

## 2.4 稻田总磷径流浓度

稻田径流水总磷浓度变化如图 5。增城试验点(图 5A)对照处理 1 次样品的总磷浓度低于检出限(0.01 mg·L<sup>-1</sup>)，其余样品总磷浓度为 0.02~0.56 mg·L<sup>-1</sup>。常规施肥处理总磷浓度为 0.02~1.50 mg·L<sup>-1</sup>。清远试验点(图 5B)对照和常规施肥处理稻田径流水总磷浓度均出现超出地表水环境质量标准(GB 3838—2002) V 类水限值(0.4 mg·L<sup>-1</sup>)的现象。其中对照和常规施肥处理超标样品分别占 11%和 19%。高州试验点(图 5C)对照和常规施肥处理分别有 5 次和 12 次样品总磷浓度超过地表水 V 类水标准限值，超标率分别为 7%和 18%。3 个试验点对照处理总磷径流浓度在 0.02~1.40 mg·L<sup>-1</sup> 之间，常规施肥处理总磷浓度 0.02~1.56 mg·L<sup>-1</sup> 之间。不同试验点对照和常规施肥处理样品出现不同程度超出地表水环境质量标准 V 类水的现象。施肥对稻田径流水总磷浓度影响主要体现在施肥后短期内发生的径流事件，总体上稻田径流水总磷浓度峰值出现在降雨后 0~12 d。总体上，不同试验点稻田总磷径流浓度在不同年份变幅较大，且出现不同程度超标现象，与稻田降雨量、施肥量及施肥与降雨时间间隔有关。由于早稻季径流事件频繁，早稻季总磷径流浓度峰值及超标现象频次高于相应晚稻季。

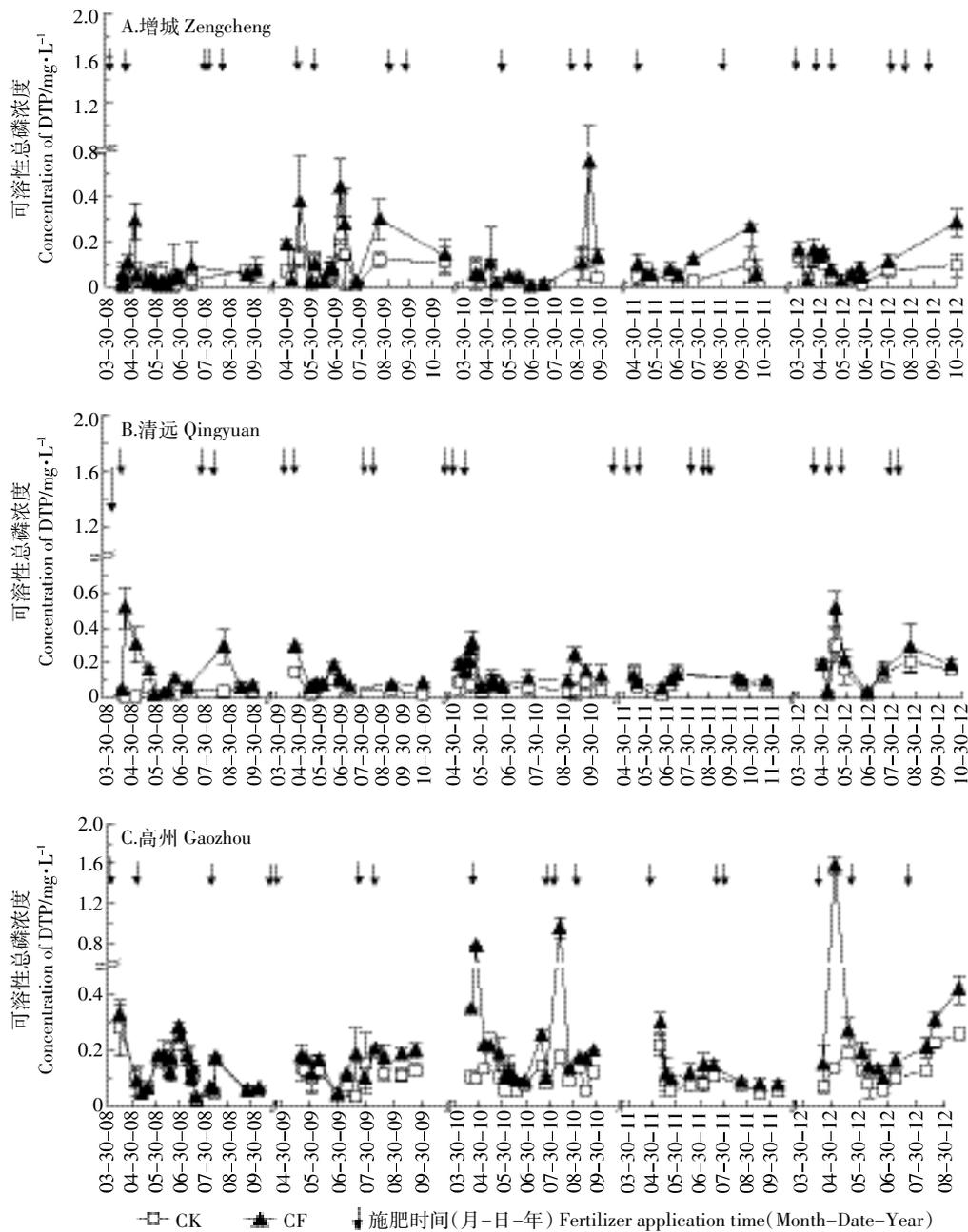


图3 稻田可溶性总磷径流浓度

Figure 3 Concentration of dissolved total phosphorus in runoff water from paddy field

### 2.5 稻田磷径流负荷

表3为不同试验点稻田磷年径流负荷变化情况。增城试验点常规施肥处理可溶性总磷流失负荷为0.87~1.74 kg·hm<sup>-2</sup>, 对照处理可溶性总磷流失负荷为0.26~0.97 kg·hm<sup>-2</sup>。施肥显著提高稻田可溶性总磷径流流失负荷44.7%~234.6%(2009年除外)。对照和常规施肥处理颗粒磷径流负荷分别为0.17~2.10 kg·hm<sup>-2</sup>和0.33~2.06 kg·hm<sup>-2</sup>, 除2008年外, 其余年份颗粒磷径流负荷在两个处理间无明显差异。该试验点常规施

肥处理总磷年径流流失负荷为1.32~3.29 kg·hm<sup>-2</sup>, 与相应对照处理总磷流失负荷(0.60~2.36 kg·hm<sup>-2</sup>)相比, 无显著差异。

清远试验点对照处理可溶性总磷年流失负荷在0.23~0.79 kg·hm<sup>-2</sup>之间, 常规施肥处理可溶性总磷年流失负荷相比相应对照处理提高14.67%~173.91%, 且2008、2009、2010年两者之间差异性均达到显著水平。对照和常规施肥处理颗粒磷流失负荷分别为0.30~1.43 kg·hm<sup>-2</sup>和0.42~1.11 kg·hm<sup>-2</sup>, 两处理之间

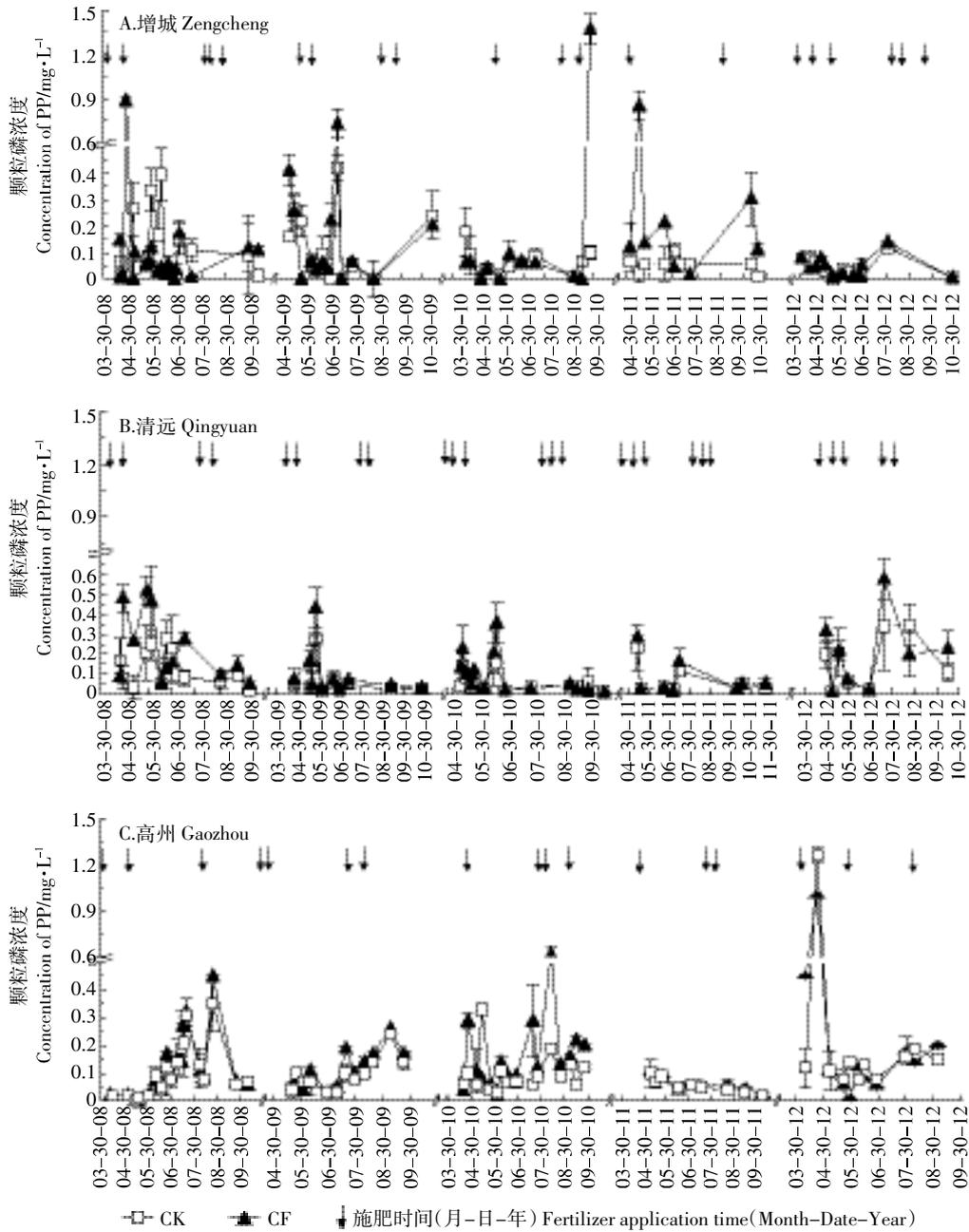


图 4 稻田颗粒磷径流浓度

Figure 4 Concentration of particulate phosphorus in runoff water from paddy field

颗粒磷流失负荷无显著差异。不同年份的对照处理总磷流失负荷在  $0.69\sim 1.66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间，与常规施肥处理总磷流失负荷 ( $1.10\sim 2.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 无显著性差异 (2010 年除外)。

高州试验点施肥显著增加稻田可溶性总磷流失负荷 (2008 年除外)。其中, 对照处理可溶性总磷流失负荷为  $0.61\sim 3.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 常规施肥处理可溶性总磷流失负荷在  $0.88\sim 4.05\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间, 相比对照提高  $6.90\%\sim 119.58\%$ 。对照和常规施肥处理颗粒磷流失负

荷分别为  $0.36\sim 2.64\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $0.40\sim 2.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施肥对该试验点颗粒磷流失负荷的影响无明显规律性, 其中 2009、2010 年和 2012 年常规施肥处理颗粒磷流失负荷较相应对照处理分别显著提高  $26.72\%$ 、 $70.00\%$  和  $48.78\%$ , 2008 和 2011 年两处理间颗粒磷流失负荷无显著差异。该试验点总磷流失负荷年际变化较大。对照处理总磷流失负荷范围在  $0.97\sim 6.18\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间, 常规施肥处理总磷流失负荷较相应对照提高  $8.09\%\sim 95.97\%$ , 且两者之间的差异性均达显著水

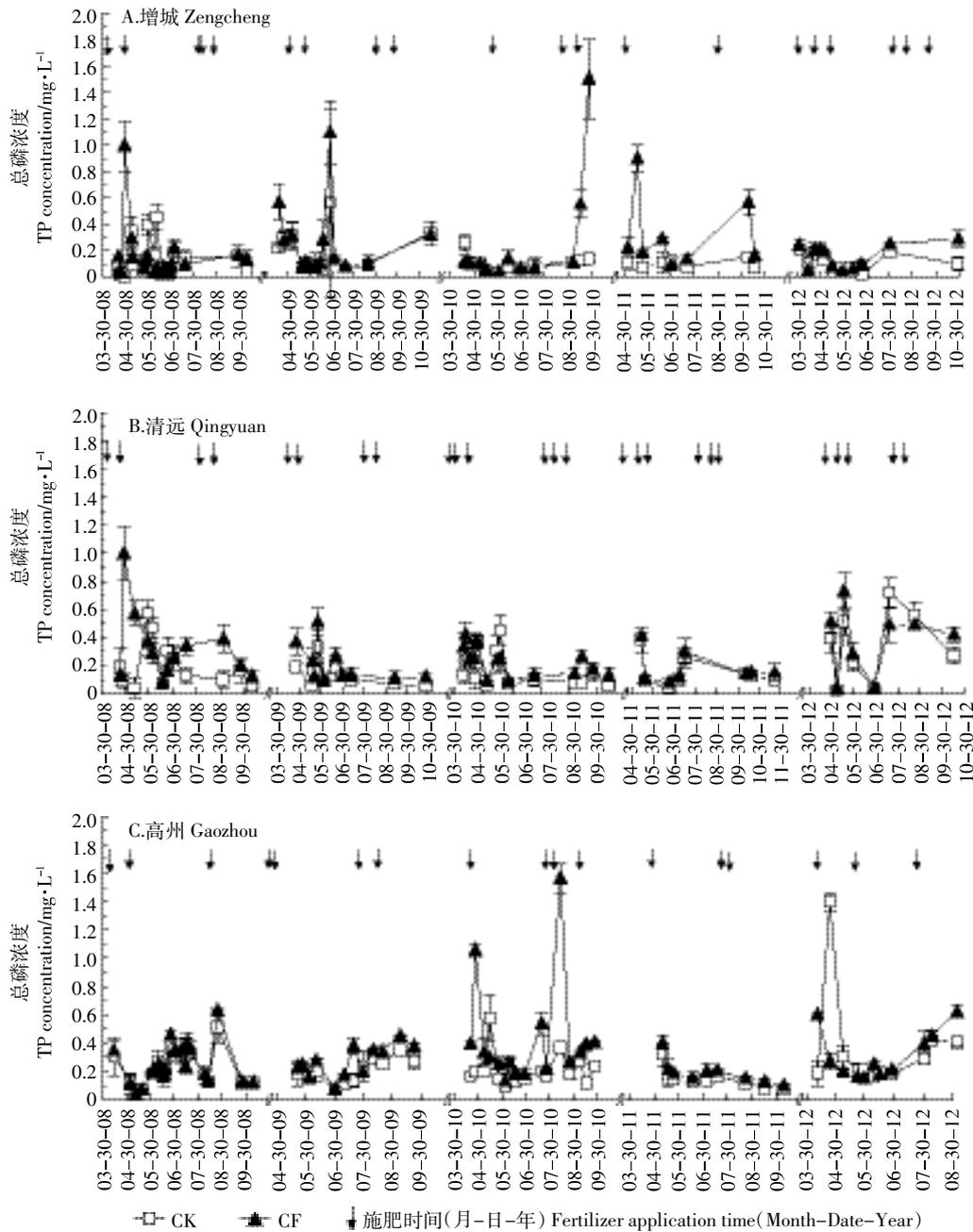


图5 稻田总磷径流浓度

Figure 5 Concentration of total phosphorus in runoff water from paddy field

平(2008年除外)。

经计算,不同试验点对照处理可溶性总磷和颗粒磷占总磷负荷百分比分别为 11.02%~81.67%和 28.33%~88.98%,常规施肥处理可溶性总磷和颗粒磷负荷所占百分比分别为 36.42%~82.99%和 21.97%~64.16%。分析显示,3个试验点5年的数据中,对照和常规施肥处理分别有 73%和 80%的数据显示可溶性总磷占总磷比例高于颗粒磷,说明可溶性总磷是稻田总磷径流损失的主要形态。

对常规施肥处理总磷流失负荷在早、晚稻季的分布情况进行分析,结果如图 6 所示。增城试验点(图 6A)总磷流失负荷在早稻季的分布比例为 74.4%~91.6%,相应晚稻季的分配比例为 8.4%~25.6%。清远试验点(图 6B)总磷流失负荷在早、晚稻季的分配比例分别为 64.7%~90.0%和 10.0%~35.3%。高州试验点(图 6C)的分配特征与增城和清远两个试验点相似,早稻季总磷流失负荷的分配比例达到 53.4%~85.0%,明显高于晚稻季的 15.0%~46.6%。总体上,不同试验

表 3 稻田磷年径流流失负荷(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 Runoff loads of total phosphorus in paddy fields(kg·hm<sup>-2</sup>)

试验点 Experimental site	指标 Parameter	处理 Treatments	2008	2009	2010	2011	2012
增城 Zengcheng	可溶性总磷 DTP	CK	0.26b	0.97a	0.56b	0.49b	0.76b
		CF	0.87a	1.23a	1.74a	0.96a	1.10a
	颗粒磷 PP	CK	2.10a	1.16a	0.46a	0.17a	0.51a
		CF	1.23b	2.06a	0.49a	0.33a	0.48a
	总磷 TP	CK	2.36a	2.13a	1.03a	0.60a	1.27a
		CF	2.10a	3.29a	2.23a	1.32a	1.58a
清远 Qingyuan	可溶性总磷 DTP	CK	0.23b	0.39b	0.79b	0.75a	0.61a
		CF	0.63a	0.68a	1.74a	0.86a	0.85a
	颗粒磷 PP	CK	1.43a	0.30a	0.55a	0.62a	0.66a
		CF	1.11a	0.42a	0.70a	0.73a	0.72a
	总磷 TP	CK	1.66a	0.69a	1.34b	1.37a	1.28a
		CF	1.73a	1.10a	2.44a	1.60a	1.57a
高州 Gaozhou	可溶性总磷 DTP	CK	3.54a	1.54b	1.43b	0.61b	2.12b
		CF	3.77a	2.12a	3.14a	0.88a	4.05a
	颗粒磷 PP	CK	2.64a	1.31b	1.30b	0.36a	1.23b
		CF	2.91a	1.66a	2.21a	0.40a	1.83a
	总磷 TP	CK	6.18a	2.85b	2.73b	0.97b	3.35b
		CF	6.68a	3.78a	5.35a	1.28a	5.88a

注: 同列不同小写字母代表 CK 和 CF 处理差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same column represent significant difference between CK and CF treatments at  $P<0.05$  level.

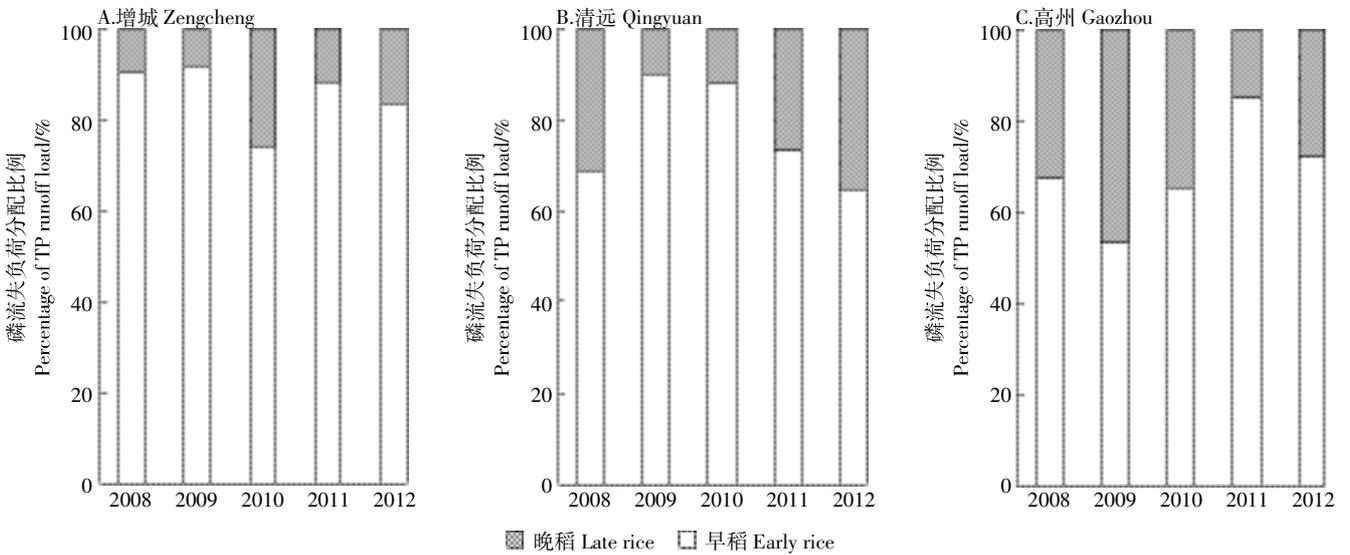


图 6 稻田总磷流失负荷在早、晚稻季的分配比例

Figure 6 Percentage of total phosphorus runoff load in early rice season and late rice season

点稻田总磷流失负荷年际变化较大,且总磷流失负荷在早稻季的分布比例均远高于晚稻季,说明早稻季是稻田磷流失的主要时段,这与本地区稻田径流特征类似。

### 2.6 稻田磷径流系数

各试验点稻田磷径流系数年际变化较大(图 7)。

增城试验点 2008 年稻田磷径流系数为负值,说明施肥处理磷流失负荷低于不施肥对照处理;2009—2012 年磷径流系数分别为 2.36%、1.88%、1.07%和 0.36%。清远试验点中,稻田磷流失系数在 0.06%~0.34% 之间,变幅相对较小。相比增城和清远试验点,高州试验点稻田磷流失系数变幅较大,其中 2010 年和 2012 年

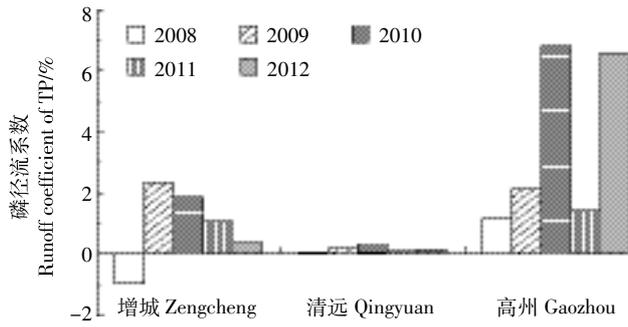


图 7 稻田磷径流系数

Figure 7 Runoff coefficient of total phosphorus in paddy fields

磷流失系数分别达到 6.81% 和 6.57%, 2008、2009 年和 2011 年磷流失系数分别为 1.17%、2.15% 和 1.43%。总体上, 不同试验点、不同年份间稻田磷流失系数变化均较大。

### 2.7 影响稻田磷径流流失的主要因素分析

对 3 个试验点连续 5 年的监测数据包括降雨量、径流量、施肥与降雨时间间隔, 以及稻田氮、磷、钾养分投入量等(表 4)可能影响稻田磷径流流失的指标进行综合分析。其中, 施肥与降雨时间间隔数据选择总磷浓度峰值对应的施肥后天数, 同一年中有多个总磷浓度峰值, 选择浓度峰值最高的数值对应的施肥后天数。对表 4 数据进行标准化处理后, 利用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析。

主成分分析结果如表 5 所示。成分 1 贡献率 53.25%, 说明成分 1 可解释影响稻田磷径流流失因素变异的 53.25%; 成分 2 能解释 29.89%。前 2 个成分

的累计方差贡献率达 83.15%, 可有效解释影响磷径流流失因素的总变异。此外, 通常选择特征根  $\lambda > 1$  的成分作为主成分。结合成分 1 和成分 2 贡献率及其特征根值, 可以确定成分 1 和成分 2 为影响稻田磷径流流失的主成分。进一步分析两个主成分各因子的贡献率(表 6), 第 1 主成分主要综合了氮、磷、钾施肥量信息, 可命名为施肥量因素。施肥量主成分中施钾量载荷量高于施氮量和施磷量。第 2 主成分贡献最大的是径流量, 载荷量 0.979; 其次为降雨量, 载荷量 0.970。主成分 2 可命名为水量因素。总体上, 影响稻田磷径流流失的主要因素为施肥量和水量(降雨量和径流量)。

### 3 讨论

降雨是产生地表径流的主要驱动因素, 降雨量直接影响径流量大小<sup>[15-16]</sup>。本文中, 稻田径流量与降雨量呈显著直线正相关关系, 说明降雨是导致本地区稻田

表 5 稻田磷径流流失影响因素主成分分析

Table 5 Principal component analysis of factors affecting phosphorus runoff from paddy field

主成分数 Principal component	特征根 Eigenvalue	贡献率 Rate of contribution/%	累计贡献率 Cumulative contribution/%
1	3.20	53.25	53.25
2	1.79	29.89	83.15
3	0.61	10.11	93.25
4	0.30	4.91	98.17
5	0.08	1.29	99.45
6	0.03	0.55	100.00

表 4 稻田磷径流流失影响因素

Table 4 Factors affecting phosphorus runoff from paddy fields

试验点 Experimental sites	年份 Year	降雨量 Precipitation/mm	径流量 Runoff/mm	施 N 量 N level/kg·hm <sup>-2</sup>	施 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> level/kg·hm <sup>-2</sup>	施 K <sub>2</sub> O 量 K <sub>2</sub> O level/kg·hm <sup>-2</sup>	施肥与降雨间隔 Time interval/d
增城 Zengcheng	2008	1 979	1 599	228	65	121	2
	2009	1 383	914	281	49	139	12
	2010	1 507	909	305	64	64	13
	2011	1 017	529	285	113	113	13
	2012	1 708	979	285	90	203	7
清远 Qingyuan	2008	1 141	742	491	250	337	3
	2009	772	441	317	214	183	13
	2010	1 652	912	402	326	326	8
	2011	1 123	732	389	204	321	3
	2012	1 210	576	137	50	77	12
高州 Gaozhou	2008	998	539	486	170	227	7
	2009	2 831	2 292	294	98	47	12
	2010	1 429	1 103	222	99	111	8
	2011	1 750	1 138	418	121	190	6
	2012	1 210	576	137	50	77	12

表 6 主成分分析旋转后的成分载荷矩阵

Table 6 Rotated component matrix of principal component analysis

主成分 Principal component	主成分因子 Factors					
	降雨量 Precipitation	径流量 Runoff	施氮量 N level	施磷量 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> level	施钾量 K <sub>2</sub> O level	施肥与降雨间隔 Time interval
1	-0.094	-0.114	0.858	0.836	0.917	-0.754
2	0.970	0.979	-0.114	-0.257	-0.29	-0.248

径流的主要因素。广东地区 80%左右年降雨量集中于 4—9 月<sup>[17]</sup>,涵盖了早稻整个生育期,使早稻季成为本地区稻田径流主要发生时段。

诸多研究表明,径流是农田土壤磷流失的主要途径<sup>[13,17-18]</sup>。本文中,广东地区常规施肥模式下稻田径流水总磷浓度在 0.02~1.56 mg·L<sup>-1</sup> 之间,浓度变幅高于湖北省稻田总磷(0.16~0.49 mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[19]</sup>和湖南省双季稻系统总磷(0.047~0.209 mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>径流浓度值。稻田磷径流浓度受土壤性质、降雨、灌溉、施肥量、耕作等多种因素的影响,导致不同地区稻田磷径流浓度呈现较大变化。叶玉适等<sup>[21]</sup>、施泽升等<sup>[22]</sup>分别针对太湖流域和洱海北部稻田的研究表明,施磷 2 周(14 d)内是稻田磷素径流流失高峰期。周萍等<sup>[23]</sup>针对江汉平原稻田研究表明,施磷后 7 d 是稻田磷流失的高危险期,24 d 后是稻田磷安全排放期。本文针对广东地区 3 个试验点连续 5 年的监测结果也表明,施磷后 14 d 内易导致稻田径流水总磷、可溶性总磷及颗粒磷浓度出现峰值,环境风险较高。不同地区稻田磷径流负荷变化较大。广东地区稻田总磷年流失负荷在 1.10~6.68 kg·hm<sup>-2</sup> 之间,折合后明显高于浙北稻田土壤磷(P)单季径流负荷,即 0.179~0.454 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[24]</sup>、0.07~0.15 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[25]</sup>,与紫色土稻田磷径流流失负荷 0.52~3.20 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[26]</sup>、太湖流域稻田单季磷径流流失量 0.95 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[27]</sup>、0.38~0.54 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[28]</sup>相接近,亦接近于宁夏引黄灌区稻田磷年径流负荷 6.9 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[29]</sup>。Sharpley 等<sup>[30]</sup>指出,农田土壤磷当季流失量通常不超过 5%。研究显示,浙江稻田磷流失系数低于 1%<sup>[25]</sup>,紫色土地区磷流失量占施磷量 2.23%<sup>[31]</sup>,湖南双季稻系统磷流失系数 0.327%~0.966%<sup>[32]</sup>,湖北稻田总磷平均流失系数 0.37%<sup>[19]</sup>。Cho<sup>[33]</sup>针对韩国中部地区稻田的研究显示,稻田磷流失系数 1.0%。广东地区稻田磷径流系数总体在 0.06%~6.81% 之间,与目前国内外相关研究结果接近。

稻田磷通常以溶解态的可溶性总磷以及吸附于土体的颗粒磷两种形态流失。梁新强等<sup>[25]</sup>、Zhang 等<sup>[28]</sup>、杨丽霞等<sup>[34]</sup>的研究表明,颗粒磷是稻田磷径流流失的主导形态,这是由于磷肥施用后主要吸附于土壤层表

面,降雨冲击动能引起土壤吸附的颗粒磷流失。而陆欣欣等<sup>[33]</sup>、朱坚等<sup>[20]</sup>、李学平等<sup>[31]</sup>指出可溶性磷为稻田主要的磷径流形态,这归因于稻田径流的发生主要由降雨和排水造成,物理冲刷作用引起的颗粒磷流失较少,导致磷主要以溶解性磷流失。广东稻田磷径流流失总体上以可溶性总磷为主。目前,针对稻田磷径流流失主要形态的研究尚未有一致的结论,这主要由于稻田磷流失受土壤性质、土壤结构、水文条件、降雨产流、施肥等多种自然和人为因素的影响。已有研究显示,径流量和施肥与径流发生时间间隔分别是影响磷径流负荷的关键因素和重要因素<sup>[34-35]</sup>,且磷径流损失与施磷量呈显著正相关<sup>[34]</sup>。本文中,利用主成分法对稻田磷径流流失的影响因素分析显示,施肥量、降雨和径流量是决定磷径流损失的主要因素,施肥与降雨间隔的影响相对较小。稻田磷径流形态及影响因素尚需进一步深入研究。

#### 4 结论

(1)稻田径流量与降雨量呈显著正相关关系,径流系数为 47.6%~81.0%。早稻季是广东地区稻田径流主要发生时段。

(2)施磷不同程度增加稻田可溶性总磷径流浓度,对总磷和颗粒磷径流浓度的影响无明显规律性。施磷后两周(14 d)内降雨易导致稻田总磷、可溶性总磷和颗粒磷浓度峰值,对地表水环境具有一定污染风险。

(3)施磷不同程度增加稻田可溶性总磷径流负荷,对颗粒磷和总磷流失负荷无明显影响。常规施肥模式下稻田总磷年流失负荷为 1.10~6.68 kg·hm<sup>-2</sup>,总磷流失系数为 0.06%~6.81%(增城点 2008 年数据除外),可溶性磷是稻田磷径流损失的主要形态。

(4)总体上,不同试验点、不同监测时间磷径流浓度、径流负荷、径流系数的年际变化较大,施肥、降雨和径流是影响稻田磷径流流失的主要因素。

#### 参考文献:

[1] Chien S H, Prochnow L I, Tu S, et al. Agronomic and environmental as-

- pects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: An update review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89: 229-255.
- [2] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 261-266.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010. People's Republic of China Environmental Protection Department, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The first national pollution source census bulletin[R]. 2010. (in Chinese)
- [4] 高伟, 周丰, 郭怀成, 等. 滇池流域高分辨率氮、磷排放清单[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 240-250. GAO Wei, ZHOU Feng, GUO Huai-cheng, et al. High-resolution nitrogen and phosphorus emission inventories of Lake Dianchi Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 240-250. (in Chinese)
- [5] 刘晓南, 吴志峰, 程炯, 等. 珠江三角洲典型流域颗粒态氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1432-1436. LIU Xiao-nan, WU Zhi-feng, CHENG Jiong, et al. Estimation of the loads of particulate nitrogen and phosphorus in typical drainage area of Pearl River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1432-1436. (in Chinese)
- [6] Sharpley A N, Foy R, Withers P. Practical and innovative measures for control of agricultural phosphorus losses to water: An overview[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 1-9.
- [7] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. Statistics Bureau of Guangdong Province, Guangdong Investigation Corps of National Bureau of Statistics. Guangdong statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 董稳军, 黄旭, 郑华平, 等. 广东省 60 年水稻肥料利用率综述[J]. 广东农业科学, 2012(7): 76-79. DONG Wen-jun, HUANG Xu, ZHENG Hua-ping, et al. Review on fertilizer use efficiency of Guangdong over the past sixty years[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(7): 76-79. (in Chinese)
- [10] 广东省土壤肥料总站. 珠江三角洲耕地质量评价与利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. Soil and Fertilizer Station of Guangdong. Evaluation and utilization of cultivated land quality in the Pearl River Delta[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 曾招兵, 曾思坚, 汤建东, 等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 444-451. ZENG Zhao-bing, ZENG Si-jian, TANG Jian-dong, et al. Space-temporal variation of farmland soil AP in Guangdong Province and their causing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3): 444-451. (in Chinese)
- [12] Jain S K, Tyagi J, Singh V. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2010, 2: 267-281.
- [13] 陆欣欣, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 394-400. LU Xin-xin, YUE Yu-bo, ZHAO Zheng, et al. Phosphorus loss and migration characteristics in paddy fields under different fertilization treatments[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 394-400. (in Chinese)
- [14] 曹银贵, 周伟, 王静, 等. 基于主成分分析与层次分析的三峡库区耕地集约利用对比[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 291-296. CAO Yin-gui, ZHOU Wei, WANG Jing, et al. Comparative on regional cultivated land intensive use based on principal component analysis and analytic hierarchy process in Three Gorges Reservoir area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4): 291-296. (in Chinese)
- [15] García-Rodeja I, Gil-Sotres F. Prediction of parameters describing phosphorus-desorption kinetics in soils of Galicia(Northwest Spain)[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1363-1369.
- [16] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993. Guangdong Province Office of Soil Survey. Guangdong soil[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
- [17] Hart M R, Quin B F, Nguyen M L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 1954-1972.
- [18] 张翼, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(1): 1-7. ZHANG Yi, YUE Yu-bo, ZHAO Zheng, et al. Nitrogen and phosphorus loss in paddy field with different fertilizer application[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2015, 33(1): 1-7. (in Chinese)
- [19] 段小丽, 范先鹏, 张富林, 等. 湖北省稻田地表径流氮磷养分流失规律初探[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(18): 3953-3957. DUAN Xiao-li, FAN Xian-peng, ZHANG Fu-lin, et al. Regular pattern of nitrogen and phosphorus losses in rice field of Hubei Province[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(18): 3953-3957. (in Chinese)
- [20] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1626-1634. ZHU Jian, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effects of straw-returning on double cropping rice yield and runoff loss of nitrogen and phosphorus in paddy fields[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11): 1626-1634. (in Chinese)
- [21] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1125-1135. YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, LI Liang, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 35(4): 1125-1135. (in Chinese)
- [22] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 838-846.

- SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentration in surface waters of paddy soils in the northern areas of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):838-846. (in Chinese)
- [23] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4):47-50, 116.  
ZHOU Ping, FAN Xian-peng, HE Bing-hui, et al. Research of loss risk of phosphorus in surface water of paddy soil in Jiangnan Plain region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4):47-50, 116. (in Chinese)
- [24] 舒涛. 浙北稻田土壤磷素流失研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.  
SHU Tao. Research on soil phosphorus losses in paddy field of north Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [25] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):59-63.  
LIANG Xin-qiang, TIAN Guang-ming, LI Hua, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):59-63. (in Chinese)
- [26] 李学平. 紫色土稻田磷素迁移流失及环境影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2008.  
LI Xue-ping. Research on paddy field phosphorus migration loss and its effect on environment in purple soil zone[D]. Chongqing: South-western University, 2008. (in Chinese)
- [27] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(4):495-500.  
JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from Qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4):495-500. (in Chinese)
- [28] Zhang H, Cao Z, Wang G, et al. Winter runoff losses of phosphorus from paddy soils in the Taihu Lake region of South China[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1461-1466.
- [29] 张学军, 陈晓群, 刘宏斌, 等. 宁夏引黄灌区稻田氮磷流失特征初探[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5):1202-1209.  
ZHANG Xue-jun, CHEN Xiao-qun, LIU Hong-bin, et al. Preliminary study on nitrogen and phosphorus loss in Yellow River irrigated paddy field of Ningxia[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(5):1202-1209. (in Chinese)
- [30] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(3):437-451.
- [31] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(2):435-439.  
LI Xue-ping, SHI Xiao-jun. Dynamic characteristics of phosphorus in purple paddy soil and its environmental impact[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2):435-439. (in Chinese)
- [32] 石丽红, 纪雄辉, 李洪顺, 等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(4):551-557.  
SHI Li-hong, JI Xiong-hui, LI Hong-shun, et al. Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff under different application in the double cropping rice fields in Hunan[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4):551-557. (in Chinese)
- [33] Cho J Y. Seasonal runoff estimation of N and P in a paddy field of central Korea[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65:43-52.
- [34] 杨丽霞, 杨桂山. 施磷对太湖流域水稻田磷素径流流失形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5):31-34.  
YANG Li-xia, YANG Gui-shan. Effects of phosphorus application on P forms in runoff from rice field of Taihu watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5):31-34. (in Chinese)
- [35] 徐爱兰, 王鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3):1106-1111.  
XU Ai-lan, WANG Peng. Phosphorus losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1106-1111. (in Chinese)