

我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算

杨旺鑫^{1,2}, 夏永秋^{2*}, 姜小三^{1*}, 颜晓元²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:农田磷素随地表径流向水体迁移导致磷肥利用率降低、生产成本上升、环境污染风险增加,收集近10年农田总磷径流损失的试验数据,并结合其对应的潜在影响因素进行统计分析,结果表明水田、旱地TP径流损失量与土壤全磷、粘粒含量百分比显著负相关,与施磷量、降雨量显著正相关。采用多元逐步回归方法,构建了单位面积水田、旱地总磷径流损失量估算模型。运用该模型对各省水田、旱地中TP径流损失量进行了估算,结果表明单位面积水田中TP径流损失量范围为0.585~3.015 kg·hm⁻²,单位面积旱地中TP径流损失量范围为0.045~0.473 kg·hm⁻²。2011年全国水田TP径流损失总量变化在3.554~5.875万t,平均值为4.715万t;全国旱地TP径流损失总量变化在0.951~2.347万t,平均值1.649万t;全国农田TP径流损失总量平均值为6.364万t。

关键词:水田;旱地;影响因素;总磷径流损失量;模型

中图分类号:S143 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)02-0319-07 **doi:**10.11654/jaes.2015.02.016

Influencing Factors and Estimation of Total Phosphorus Runoff from Farmlands in China

YANG Wang-xin^{1,2}, XIA Yong-qiu^{2*}, JIANG Xiao-san^{1*}, YAN Xiao-yuan²

(1.College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Phosphorus (P) losses via runoff from farmlands to water not only decrease the efficiency of fertilizer P, but may also cause water pollution. In this paper, we identified the influencing factors and estimated the amount of P runoff losses from farmlands in mainland China via statistically analyzing the recent 10 year experimental results on P runoff losses in farmlands. Total P runoff losses were negatively correlated with soil TP and clay contents, but positively with P application rates and rainfall. According to the 2012 China Statistical Yearbook and the 2012 China Meteorological Yearbook, the TP runoff losses from paddy fields and upland fields for each province were estimated, and ranged from 0.585 kg·hm⁻² to 3.015 kg·hm⁻² in the paddy fields and 0.045 kg·hm⁻² to 0.473 kg·hm⁻² in the upland fields in 2011. The corresponding total amounts of TP runoff losses were from 0.036 Tg to 0.059 Tg, with a mean value of 0.047 Tg, and from 0.009 Tg to 0.024 Tg, with an average of 0.017 Tg. Our results show that the average content of TP runoff losses would be 0.064 Tg from farmland in China in 2011.

Keywords: paddy field; upland field; influencing factor; TP runoff loss; model

我国不少湖泊以及水库营养化程度加剧,太湖、巢湖、滇池等重要水域的污染给人们的生活带来了极大的不便,引起了广泛重视^[1]。氮磷等元素进入封闭或半封闭的水域后,导致某些藻类异常增殖,溶解氧降低,水质下降,而磷是水体产生富营养化的限制因素,如果磷素未达到一定含量,仅有碳、氮等元素不会引

起水体富营养化^[2]。一般认为水中TP>0.02 mg·L⁻¹、TN达到0.2~0.5 mg·L⁻¹时,水体便处于富营养化状态^[3]。土壤对磷肥有很强的固定作用,磷肥的当季利用率只有5%~15%,加上后效也不会超过25%,剩余的磷素由于无法被利用就会在土壤中积累,环境风险逐渐加大^[4]。目前农业面源污染研究的方法主要有野外实测法、输出系数法、污染指数法和物理模型法等。野外实测法是最常规、应用最广泛的方法,是其他研究方法的基础,结果可信度高,但成本大,周期长;输出系数法只能对小流域内不同土地利用类型的污染物输出负荷简单估算;污染物指数法所需数据量少且容易获

收稿日期:2014-08-20

基金项目:环保公益性行业科研专项(201309035-05)

作者简介:杨旺鑫(1988—),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事农田氮磷流失研究。E-mail: xin309@163.com

* 通信作者:夏永秋 E-mail: yqxia@issas.ac.cn;

姜小三 E-mail: gis@njau.edu.cn

得,但其结果仅反映了污染物发生流失风险潜力,不能得到实际的输出负荷;物理模型法不仅可以估算出污染物输出负荷,而且可以对面源污染的发展进行预测,但是模型对数据要求高,大量参数不能获得,很难推广^[5]。已有的研究一般都在田块尺度和流域尺度,很少有从宏观上分析种植业中总磷径流损失的研究。2009 年第一次全国污染普查根据地形地貌和气候把全国划分为六个区域,根据每一区域内的地形、种植方式、土地利用、种植模式把每个区域划分为不同的模式,通过一年的田间小区监测实验,获得每一种模式下总磷损失系数,以估算全国磷素损失量。但是由于磷素损失具有很强的时空变异,以小区域监测结果放大估算大区域磷负荷会导致很大的不确定性。

大量研究表明,农田总磷径流损失程度取决于当地的降雨情况、施肥情况、土壤条件、地形地貌特点、植被覆盖条件和人为管理措施等多种因素^[6]。本文通过收集关于农田总磷径流损失的文献,从中提取总磷径流流失量及其影响因素数据并进行回归分析,构建了大尺度集约化种植业 TP 径流损失估算模型。

1 材料与方法

为构建农田 TP 径流损失量与影响因素的相关关系,收集了关于农田 TP 径流文献中的试验数据(在提取数据时,考虑到可能有数据存在于图表中,应用 GetData Graph Digitizer 软件提取数据)。所获得文献资料年限从 2004 年至 2013 年,试验地点包括江苏、浙江、上海、安徽、湖南、四川、广东、福建,种植作物包括水稻、小麦、玉米、油菜、棉花(表 1)。本文只选择肥料种类为化肥、复合肥的数据,对有机肥、控释肥的数据予以剔除。文献中的试验方法基本为田间试验,在试验开始前采用土壤农化常规分析法得到试验田土壤基本性质,把试验田划分为若干个小区,作不同的施肥处理,各小区间用塑料板或水泥板隔开,防止养分和水分交换。每个小区对应一个径流池,用于收集降雨产生的径流。每次降雨产生径流后收集径流水,测定水样的总磷浓度,然后测定径流池水位,计算径流量。将径流水中总磷浓度与径流量相乘,得到总磷径流损失量。

土地利用类型与农田地表径流磷有着极为重要的联系,不同的土地利用类型对地表径流和氮磷的流失量有着显著的影响^[7-8]。旱地和水田是两种不同的土地利用方式,耕作和灌溉方式有着明显的差异。水稻田常年储水,淹水条件下由于土壤理化性质的变化,

表 1 农田总磷径流损失方面的文献

Table 1 Literature about phosphorus runoff losses from farmlands

地点 Location	作物 Crop	数据组数 Number of data	出处 Reference
江苏省	水稻	6	朱利群等,2012
安徽省	水稻	10	张丽娟等,2011
湖南省	水稻	4	杨益新,2011
上海市	水稻	3	杨蓓蓓等,2009
四川省	玉米	3	徐泰平等,2006
江苏省	水稻	5	谢学俭等,2007
江苏省	水稻	4	夏小江等,2011
江苏省	水稻	6	席运官等,2009
江苏省	水稻	6	席运官等,2010
安徽省	小麦	4	王静等,2012
湖南省	水稻	10	石丽红等,2010
浙江省	水稻	3	倪雄伟等,2012
安徽省	小麦	5	刘晓轻,2011
江苏省	小麦	12	刘晓凯,2012
江苏省	小麦	5	谢学俭等,2007
江苏省	水稻	5	赵建宁等,2005
广东省	水稻	8	张威等,2009
福建省	水稻	9	张玉树等,2012
重庆市	小麦、玉米	15	何丙辉等,2012
湖南省	玉米、油菜	10	段然等,2013
江苏省	水稻、小麦	16	张焕朝等,2004
安徽省	玉米、棉花	4	焦平金等,2009
安徽省	小麦、玉米、棉花	16	焦平金,2013
全国	水稻、小麦、玉米、油菜	17	第一次全国污染普查,2009

导致土壤对磷的固定与释放发生很大的变化^[9]。因此,本研究在分析中把农田分为水田和旱地两个部分。受文献中试验条件、目的限制并借鉴相关研究,本文选取降雨量(mm)、施磷量(kg·hm⁻²)、土壤全磷(%)、粘粒(%)四个影响因素,磷肥施用量统一换算为 P₂O₅ 的量。收集影响总磷径流的因素时会出现缺失值,如土壤理化性质、每季作物生长期内的降雨量等,本文利用中国科学院南京土壤研究所中国土壤数据库对土壤基本性质进行补充,查阅研究区的统计年鉴对试验期间的降雨量进行补充。

使用 Excel 2007 进行数据整理,建立农田总磷径流损失量与影响因素数据库,剔除离群值后对数据进行相关性分析和回归分析,建立总磷径流损失量与影响因素间的回归模型。查阅统计年鉴得到 2011 年各省施磷量、播种面积、年平均降雨量,然后根据回归模型对我国农田总磷径流损失量进行初步估算。

2 结果与分析

2.1 农田总磷径流损失影响因素的一元线性回归分析

土壤表层溶质随地表径流迁移是一个十分复杂的过程,受到包括降水、施肥、土壤性质等众多因素的影响。其中降水是土壤溶质的溶剂和载体,也是土壤磷素迁移的驱动力,水的迁移过程制约和决定着土壤溶质的迁移过程^[10];施磷量可以直接提高土壤表层速效磷的含量,随着施磷量的增加,由径流所造成的磷的损失量明显增加^[11];土壤通过质地、全磷含量等性质影响着农田总磷径流的损失。为了探讨单一因素对农田总磷径流损失量的影响,对数据进行相关分析和一元线性回归分析,采用数学统计软件 SPSS 对回归方程进行拟合优度检验和显著性检验。

2.1.1 与土壤全磷含量间的关系

由图 1 可知,土壤全磷含量百分比与农田总磷径流损失量呈极显著负相关。水田、旱地 TP 径流损失量($y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与土壤全磷含量百分比($x, \%$)的关系如图 1 所示,其相关关系式如下:

$$y = -14.49x + 1.758 \quad (1)$$

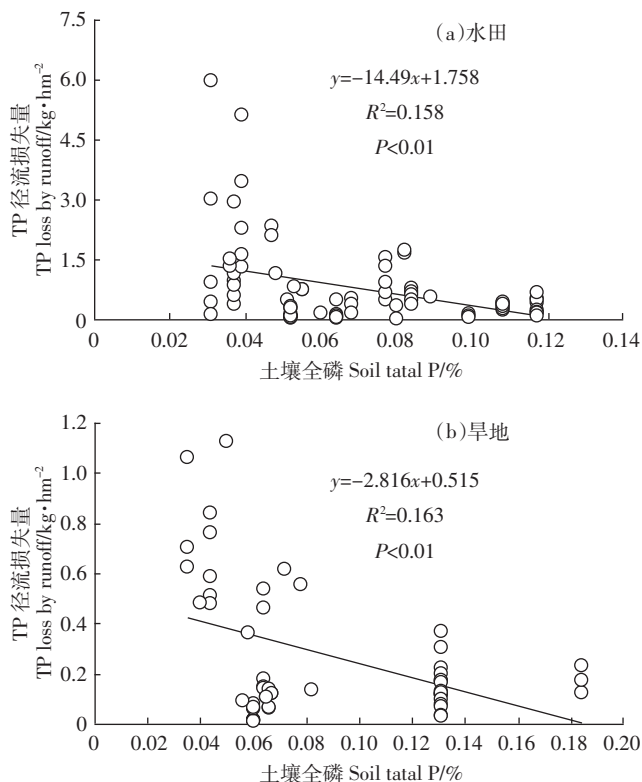


图 1 水田和旱地 TP 径流损失量与土壤全磷之间的关系

Figure 1 Relationship between TP runoff losses and soil total P in paddy fields(a) and upland fields(b)

$$y = -2.816x + 0.515 \quad (2)$$

本文土壤全磷是指未施磷肥前土壤中磷素的总和即土壤本底值,含量受土壤母质、成土作用影响,土壤类型不同本底值亦不同。土壤中的磷素经过一系列的化学、物理化学和生物化学反应,大部分被土壤固体颗粒吸附或者被土壤微生物固定形成难溶性的无机磷盐,当中一部分与富里酸结合形成中稳定性有机磷、与胡敏酸结合形成高稳定性有机磷,增强了土壤的稳定性。根据图 1 土壤全磷含量的范围可知土壤有效磷含量还未超过流失到环境中需要的临界饱和度,此时土壤对磷以吸附固定为主。该条件下土壤全磷含量越高,表明土壤对磷的吸附能力越强,稳定性越好,遇到降雨时流失的风险就越低。

2.1.2 与土壤粘粒间的关系

水田、旱地 TP 径流损失量($y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与土壤粘粒含量百分比($x, \%$)的关系如图 2 所示,其相关关系式如下:

$$y = -0.026x + 1.544 \quad (3)$$

$$y = -0.014x + 0.691 \quad (4)$$

土壤粘粒含量与农田总磷径流损失量极显著负

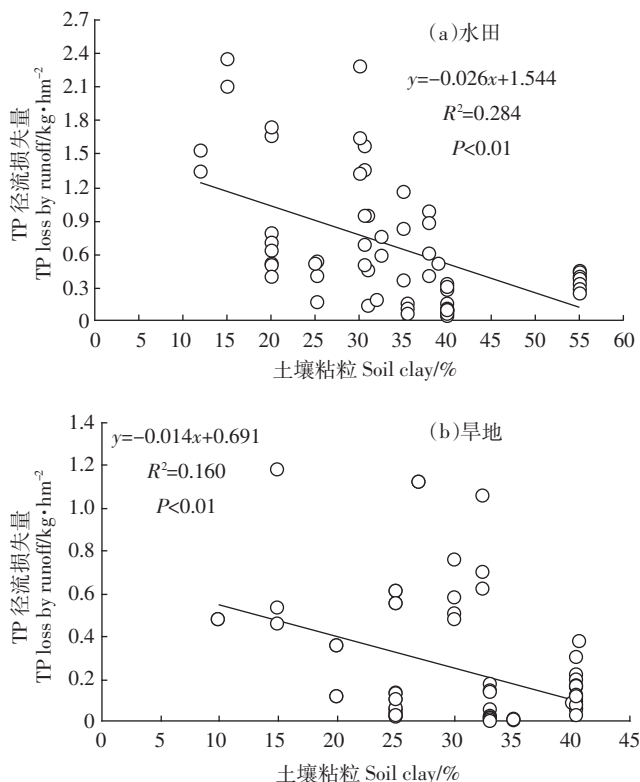


图 2 水田和旱地 TP 径流损失量与土壤粘粒之间的关系

Figure 2 Relationship between TP runoff losses and soil clay content in paddy fields(a) and upland fields(b)

相关。这是因为粘粒是土壤中最活跃的组成之一,影响到土壤表面积和电荷数量,从而影响到土壤对磷的吸附固定及养分的有效性。粘粒含量多的土壤,土壤粒间孔隙小,细孔往往被水占据,通气不畅,好气性微生物活动受到抑制,有机质分解缓慢,腐殖质与粘粒结合更紧密,因而养分容易积累,所以粘质土保肥能力更强,磷素等养分的流失要比砂质土少。另外,土壤磷最大吸附量与粘粒含量呈显著线性正相关关系^[12],质地细的土壤磷吸附量大、吸附能力强,磷素移动性差,流失量小。

2.1.3 与施磷量间的关系

水田、旱地 TP 径流损失量($y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与施磷量($x, \text{P}_2\text{O}_5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的关系如图 3 所示,其相关关系式如下:

$$y=0.008x+0.141 \quad (5)$$

$$y=0.001x+0.006 \quad (6)$$

随着施磷量的增加,土壤中磷含量相应提高,较大的磷肥施用量会造成土壤中磷素不同程度盈余富集,可能导致部分施加的磷无法被吸收而停留在土地表层,导致磷养分的流失量增加。有研究表明随着施磷量的增加,径流水中总磷的浓度、流失量显著增

加^[13]。另外,高施磷量可以降低土壤磷素的最大吸附量,提高土壤磷素的吸附饱和度,而饱和度处于较高状态则表现为磷素释放到表面的潜能增加。

2.1.4 与降雨量间的关系

水田、旱地 TP 径流损失量($y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)与降雨量(mm)的关系如图 4 所示,降雨与农田总磷径流损失量极显著正相关,其相关关系式如下:

$$y=0.001x-0.301 \quad (7)$$

$$y=0.0004x-0.0276 \quad (8)$$

降雨是土壤磷素流失的主要驱动力,也是磷流失的溶剂和载体。降雨进入农田土壤系统后,由于植物截留、洼地填蓄和土壤吸收等作用会使雨水滞留在农田中,但是随着降雨量的增加多余的雨水通过地表径流等方式脱离农田系统,在此过程中伴随着农田氮磷等营养元素的流失,随着降雨量的增加土壤中磷损失量也升高。

2.2 农田总磷径流损失影响因素的多元逐步回归分析

由一元线性回归分析可知农田总磷径流损失是与多个因素相关的,用多个影响因素的最优组合共同预测或估算总磷径流损失比只用一个因素进行预测

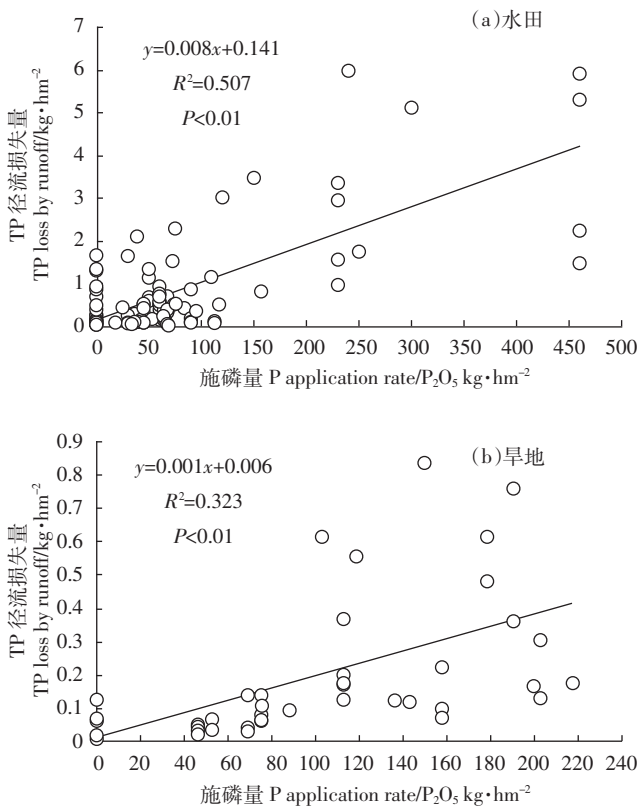


图3 水田和旱地 TP 径流损失量与施磷量之间的关系

Figure 3 Relationship between TP runoff losses and fertilizer P rates in paddy fields(a) and upland fields(b)

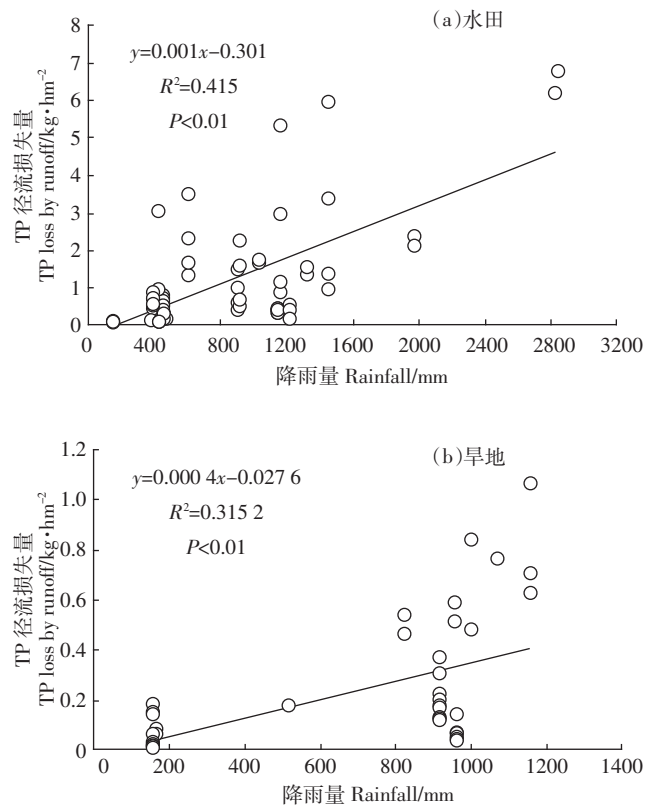


图4 水田和旱地 TP 径流损失量与降雨量之间的关系

Figure 4 Relationship between TP runoff losses and rainfall in paddy fields(a) and upland fields(b)

或估算更有效,更符合实际。根据本文遴选出的 4 个影响因素,采用多元逐步回归分析方法对农田总磷径流损失量的变化规律进行定量分析,建立大尺度估算模型,其分析模型表达式为:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots\beta_kX_k$$
 (9)

式中: β_0 是回归常数; β_1 是自变量 X_1 的偏回归系数; β_2 是自变量 X_2 的偏回归系数; β_k 是自变量 X_k 的偏回归系数; k 为自变量的个数。回归常数和回归系数可以通过样本数据分析计算获得。

根据本文遴选出的数据,采用多元逐步回归得到以下估算模型:

$$Y_1=0.958-15.808X_1+0.008X_2+0.001X_3$$
 (10)

$$Y_2=0.179-3.293X_1+0.003X_2$$
 (11)

式中: X_1 为土壤全磷含量百分比,%; X_2 为施磷量, $P_2O_5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; X_3 为降雨量,mm。 Y_1 为水田总磷径流损失量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 决定系数 R^2 为 0.613, F 值为 31.669, 达到了极显著水平($P<0.01$); Y_2 为旱地总磷径流损失量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 决定系数 R^2 为 0.528, F 值为 16.791, 达到了极显著水平($P<0.01$)。

2.3 全国总磷径流损失量的估算

通过查阅 2012 年中国统计年鉴^[14]和中国气象年鉴^[15],得到 2011 年除台湾、香港、澳门以外全国各省的年平均降雨量、磷肥施用量、农作物播种总面积、水稻(代表水田)播种面积和小麦、玉米、棉花、油菜旱作物(代表旱地)的播种面积,根据各省的磷肥施用量及播种总面积得到各省单位面积农田施磷量。

我国地域辽阔,气候复杂,地形、地貌各异,因而土壤类型多样,土壤类型的分布与全国省级行政区的划分不能完全对应,得到各省水田、旱地中土壤全磷、粘粒平均含量百分比的难度较大。因此,根据收集的

农田总磷径流文献中的试验数据,估算出水田、旱地中土壤全磷、粘粒的平均含量,见表 2。

根据 2011 年各省的平均降雨量,单位面积农田磷肥施用量以及估算出的水田、旱地中土壤全磷平均含量百分比,由式(10)、(11)估算出 2011 年各省单位面积水田、旱地中 TP 的径流损失量,见图 5。

根据全国水田和旱地中土壤全磷含量的平均值及标准差,各省单位面积施磷量、平均降雨量、水田与旱地的播种面积,计算得到全国水田 TP 径流损失总量的范围为 3.554~5.875 万 t,平均值为 4.715 万 t;全国旱地 TP 径流损失总量的范围为 0.951~2.347 万 t,平均值 1.649 万 t;全国农田 TP 径流损失总量平均值为 6.364 万 t, 低于第一次全国污染源普查公报中我国种植业总磷流失量的 10.87 万 t^[16]。这可能是由于本文中的农田仅指水稻、小麦、玉米、棉花、油菜用地,未包含其他种植业用地的缘故。

3 讨论

土壤磷可分为难溶性的和易溶性的两大类,难溶性磷占土壤总磷量的 95%~99%^[17], 主要包括吸附态和矿物态。磷的吸附主要发生在粘土矿物、氧化物和

表 2 水田和旱地土壤全磷、粘粒描述性统计结果
Table 2 Descriptive statistics of soil total P and soil clay contents in paddy fields and upland fields

农田类型 Farmland type	项目 Parameter	平均值 Mean	标准差 Std. deviation	95%置信区间 95% Confidence interval	
				下限 Lower bound	上限 Upper bound
水田 Paddy field	全磷/%	0.068	0.025	0.062	0.074
	粘粒/%	34.468	11.428	31.623	37.114
旱地 Upland field	全磷/%	0.074	0.030	0.067	0.079
	粘粒/%	30.882	7.596	29.282	32.482

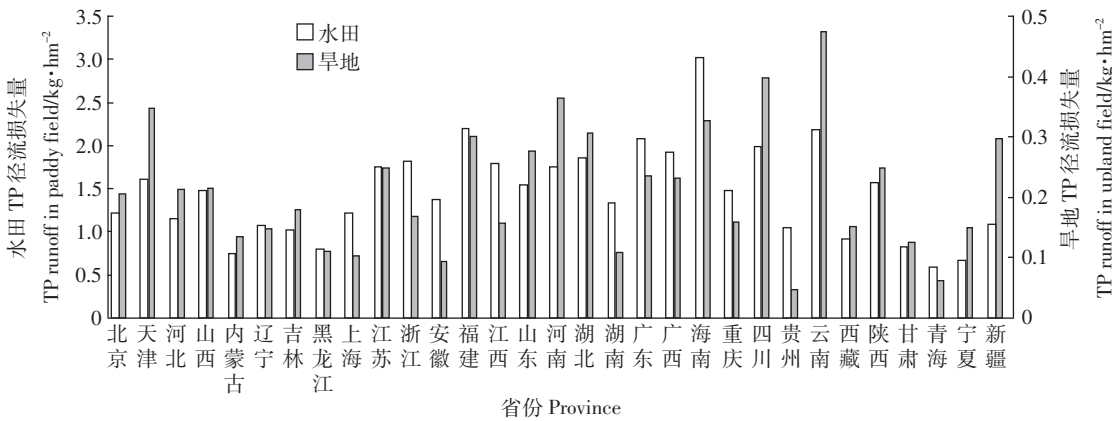


图 5 2011 年农田 TP 径流损失量省级分布图

Figure 5 Distribution of farmland TP runoff losses by province in 2011

有机固体表面,吸附程度与矿物种类、结晶程度和含量有很大关系,磷的固定在酸性土壤中主要表现为磷酸根离子沉淀在土壤中的铁铝氧化物表面,在中性或碱性土壤中主要表现为磷酸根离子与钙离子形成沉淀。本文研究得到土壤全磷含量与总磷径流损失量呈负相关,出现这一结果与土壤含磷量、磷素吸附饱和度有关。本文中土壤全磷是指施肥处理前土壤的本底值,土壤类型不同磷的本底值亦不同。相关研究表明有效磷的含量要比全磷含量低很多,由本文土壤全磷含量($0.2\sim 1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)可知,土壤中速效磷含量还未达到土壤富磷化的水平^[18](Olsen-P $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),尚处于未饱和状态,此时土壤对磷的固定、吸附能力大于其释放能力。土壤全磷含量高表明该土壤对磷的吸附、固定能力强,磷的流动性差,遇到降雨时磷素流失到环境中的风险就会降低。

土壤质地与土壤通气、保肥、保水状况有密切的关系,土壤中磷素的有效性及其对环境的影响主要取决于土壤粘粒复合体对磷的吸附-解吸平衡^[19]。土壤颗粒粒径的大小对土壤颗粒间的结合、孔隙大小、数量及几何形态都起着决定作用,粘粒含量越高,质地越细、分形维数越高,土壤抗侵蚀能力越强^[20],磷越不易流失。土壤质地越重,粘粒含量越高,颗粒越细,比表面积越大,吸水、保水保肥能力越强。

由于土壤的固持作用,土壤溶液中磷含量极小,但当施磷量超过某一阈值后,土壤中磷吸附位点饱和,土壤溶液中可溶性磷浓度迅速增加。随着磷肥施用量增加,土壤磷吸附饱和度增加,导致土壤易解吸磷、土壤磷易解吸率逐渐升高,土壤磷最大吸附量、土壤磷的最大缓冲能力显著降低^[21],土壤表层总磷、速效磷含量明显增加,磷径流损失风险增高。施磷量越大,径流液中总磷含量越高,径流总损失量越大。有研究表明,施用磷肥达到一定量后,土壤中用 CaCl_2 浸提的磷溶于水的量会增加,磷素易于随水流失^[22]。

在降雨的影响条件下,土壤磷素极易进入水体并造成养分流失,降雨影响磷素流失的主要因素包括降雨量、降雨强度、降雨径流时间等。降雨前土壤含水量越高,越容易在地表产生径流,磷流失风险越大。随着降雨量的增加,一方面会使水田的田面水流出、旱地的地表土随雨水的流失量增大,另一方面加强了对农田的冲刷力,从而导致农田总磷的径流损失量增加。

由于研究的地区差异,江苏、浙江、上海、安徽、湖南、四川、广东、福建等地研究数据较为丰富,而我国

其他地区数据相对缺乏,以这些数据建立的模型估算全国尺度总磷径流损失会有一定局限性。文献中有些数据存在过高或过低的特征,有的文献还存在没有当季降雨量数据等问题,只能间接地寻找相关数据进行替代,这些都会对结果的确定性产生影响。

4 结论

基于农田 TP 径流损失量与影响因素的数量关系建立了农田 TP 径流损失估算模型,运用该模型对我国农田 TP 径流损失量进行了估算。2011 年单位面积水田 TP 径流损失量的范围为 $0.585\sim 3.015\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,单位面积旱地 TP 径流损失量的范围为 $0.045\sim 0.473\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;全国水田 TP 径流损失总量的范围大致在 $3.554\sim 5.875\text{ 万 t}$ 之间,平均值为 4.715 万 t ;全国旱地 TP 径流损失总量的范围大致在 $0.951\sim 2.347\text{ 万 t}$,平均值为 1.649 万 t ;我国农田 TP 径流损失总量为 6.364 万 t 。

本文构建的农田总磷径流损失估算模型,充分考虑了自然因素和人为因素的空间差异,方法简单可行,对大尺度集约化种植业中总磷径流损失的估算具有一定的指导意义,相对以前基于单一因素(磷肥投入量)的估算,本研究更为科学可靠。

参考文献:

- [1] 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 等. 巢湖流域麦稻轮作农田径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 6-10.
WANG Gui-ling, MA You-hua, SUN Xing-hua, et al. Study of nitrogen and phosphorus runoff in wheat rice rotation farmland in Chao Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 6-10.
- [2] 王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 183-188.
WANG Dao-han, LIANG Cheng-hua. Transportation of agriculture phosphorus and control to reduce the phosphorus loss to water: A review [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 183-188.
- [3] 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 116-124.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China[J]. *Advances in Environment at Science*, 1999, 7(2): 116-124.
- [4] 杨淑静, 张爱平, 杨世琦, 等. 农业非点源污染现状分析及国内外研究进展[J]. 中国农业气象, 2009, 30(增刊 1): 82-85.
YANG Shu-jing, ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, et al. Status analysis of agricultural non-point source pollution and advances in domestic and overseas[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(Suppl1): 82-85.
- [5] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural

- non-point source pollution modeling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84:104-111.
- [6] 陈英旭. 农业环境保护[M]. 北京:化学工业出版社, 2007:184-186.
CHEN Ying-xu. Agriculture environmental protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:184-186.
- [7] Kothyari B P, Verma P K, Joshi B K, et al. Rainfall-runoff-soil and nutrient loss relationship for plot size areas of bhetagad watershed in Central Himalaya India[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 293(1-4):137-150.
- [8] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):735-739.
HUANG Yun-feng, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, et al. An experimental research on soil erosion and nitrogen, phosphorus losses under different vegetation covers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):735-739.
- [9] Sanyal S K, De Datta S K. Chemistry of phosphorous transformations in soil[J]. *Advances in Science*, 1991, 16:1-120.
- [10] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):81-85.
LIANG Fei-fei, JIANG Xian-jun, YUAN Jun-ji, et al. Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):81-85.
- [11] 盛海君, 夏小燕, 杨丽琴, 等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12):2837-2840.
SHENG Hai-jun, XIA Xiao-yan, YANG Li-qin, et al. Effects of phosphorus application on soil available P and different P form in runoff[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12):2837-2840.
- [12] 曹克丽, 李孝良. 凤阳县几种主要土壤供磷能力及其影像因素分析[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2014(2):30-32.
CAO Ke-li, LI Xiao-liang. Analysis of phosphorus supply capacity and its effect factors of several soils in Fengyang County[J]. *Journal of Mudanjiang Teachers College (Natural Sciences Edition)*, 2014(2):30-32.
- [13] 谢学俭, 陈晶中, 宋玉芝, 等. 磷肥施用量对稻麦轮作土壤中麦季磷素及氮素径流损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2156-2161.
XIE Xue-jian, CHEN Jing-zhong, SONG Yu-zhi, et al. Effects of phosphorus application rates on surface runoff losses of soil and phosphorus during wheat season in rice-wheat rotation field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2156-2161.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[R]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[R]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [15] 中华人民共和国国家气象局. 中国气象年鉴[R]. 北京:气象出版社, 2012.
China Meteorological Administration. China meteorological yearbook[R]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国污染普查公报[N]. 人民日报, 2010-02-10.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. The first national pollution census bulletin[N]. People's Daily, 2010-02-10.
- [17] 杨珏, 阮晓红, 张振贤, 等. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3):256-258.
YANG Jue, RUAN Xiao-hong, ZHANG Zhen-xian, et al. Soil circulation of phosphorus and its effects on the soil loss of phosphorus[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3):256-258.
- [18] 潘根兴, 焦少俊, 李恋卿, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(3):91-95.
PAN Gen-xing, JIAO Shao-jun, LI Lian-qing, et al. Effect of longterm fertilization practices on mobility of phosphorus in a huangnitu paddy soil receiving low P input in the Taihu Lake region, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):91-95.
- [19] 王建林, 陈家坊. 土壤中磷的解吸[J]. 土壤学进展, 1988, 16(6):10-16.
WANG Jian-lin, CHEN Jia-fang. Study on desorption of phosphorus in soil[J]. *Progress in Soil Science*, 1988, 16(6):10-16.
- [20] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4):490-497.
HUANG Guan-hua, ZHAN Wei-hua. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4):490-497.
- [21] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2):284-290.
ZHANG Hai-tao, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2):284-290.
- [22] MacDowell R W, Mahieu N, Brookes P C, et al. Mechanisms of phosphorus solubilisation in a limed soil as a function of pH[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8):685-692.