孙 铖, 周华真, 陈 磊,等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1266-1273.
SUN Cheng, ZHOU Hua-zhen, CHEN Lei, et al. The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1266-1273.

农田化肥氮磷地表径流污染风险评估

孙 铖, 周华真, 陈 磊*, 沈珍瑶

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘 要:以长江中下游地区所处的六省一市为研究对象,通过对 80 个市级行政区化肥施用情况的调研,估算了农田化肥氮磷地表径流流失量,在耦合农业化肥流失量、降雨和河网密度三种因素的基础上,提出了农田化肥氮磷污染风险分级方法并初步识别了重点区域。结果表明,近 20 年来,其化肥施用量呈现上升趋势,氮磷地表流失量较高的区域主要集中于湖南省,氮磷流失强度的平均值分别为 2.41、0.61 kg·hm^{-2}·a^{-1}。湖南省为六省一市中农田化肥氮磷污染的高风险区,上海市为低风险区,其他五省则以中、低污染风险为主。研究结果有助于实现对农田面源污染的风险防范,推动我国农业面源污染防控的优化升级。

关键词:农业面源污染;化肥;氮磷;风险评估
中图分类号:X820.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2017)07-1266-08 doi:10.11654/jaes.2017-0800

The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer

SUN Cheng, ZHOU Hua-zhen, CHEN Lei*, SHEN Zhen-yao
(Shool of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Nitrogen and phosphorus loss in farmland fertilizer is the main cause of environmental water pollution. Using six provinces and one city in the middle and lower reaches of the Yangtze River as a study area, and by investigating on the data of fertilizer of 80 municipals, we estimated the loss of nitrogen and phosphorus in surface runoff from farmland fertilizer. Based on the combination of three factors, namely fertilizer loss, rainfall, and drainage density, we put forward a scheme to classify the pollution risk from fertilizer nitrogen and phosphorus, and identified the key areas of concern preliminarily. The results show that fertilizer application has increased during the past 20 years, and areas with high nitrogen loss and phosphorus surface runoff are concentrated in Hunan Province. The average nitrogen and phosphorus loss intensities were 2.41 and 0.61 kg·hm^{-2}·a^{-1}, respectively. The zone with a high risk of pollution was Hunan Province, Shanghai City was the low risk zone, and the other five provinces were dominantly middle- and low-risk areas. These results are beneficial to preventing risk from agricultural non-point source pollution and promoting the optimization of control measures in China.

Keywords: agricultural non-point source pollution; fertilizer; nitrogen and phosphorus; environmental risk assessment

保障粮食供应是我国经济社会可持续发展的重要基础,化肥施用是粮食增产的重要环节[1]。但随着我国人口政策的改变,近年来我国人口增长速度有所加快,人均耕地面积随之减少,如何合理施用化肥以保证农作物产量成为了我国亟待解决的问题[2]。根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)和中国国家统计局提供的化肥施用量数据,2013 年全球化肥施用总量为 1.67×10^8 t,中国农业化肥施用当量为 5.91×10^7 t,占全球化肥使用总量的 35.48%。同时,单位面积化肥施用

收稿日期:2017-06-06
作者简介:孙 铖(1994—),女,吉林延边人,硕士研究生,从事农业面源污染研究工作。E-mail:13756892980@163.com
* **通信作者**:陈 磊 E-mail:chenlei1982bnu@bnu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(51579011,51409003)
Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51579011,51409003)

量超过世界平均水平三倍多,我国农田化肥过量施用面临的环境风险是其他国家无法相比的[3-4]。因此,在我国进行化肥施用调研及时空尺度的分析有益于环境管理与污染控制。

近年来,由施肥不当或过量施肥带来的环境污染问题越来越突出。农田氮磷随地表径流进入受纳水体,或随地下淋溶进入土壤,引起水体富营养化和土壤污染等农业面源污染问题[5]。而地下淋溶对于南方地区影响较小,本研究主要针对地表径流中的农田氮磷流失进行估算。随着工业污染的治理,农业氮磷流失成为水环境污染的主要来源[6]。农田氮磷流失包括地表径流和地下淋溶两个主要方面,其中地表径流为氮磷流失的主要途径,是农田化肥进入周围水体最直接、最快速的方式[7],但由于其随机性强、周期长等特点,治理起来较为困难,因此控制农田氮磷流失是控制农业面源污染的重要途径。目前,我国氮肥利用率仅为 30%~35%,磷肥利用率不足 20%,远低于发达国家水平[8]。为此,2016 年中央一号文件提出了"加大农业面源污染防治力度, 实施化肥农药零增长行动"的目标,对农田化肥调研以及对地表径流氮磷流失的估算与评估有助于实现对农田面源污染的风险防范。

本文以长江中下游所处的六省一市为研究区,以市为单位,开展农业氮磷流失(地表径流流失)估算方法和风险区域识别研究。该区域是我国重要的农业生产基地,但近年来亦产生较多的农业面源问题[9]。由于化肥的不合理利用,导致富营养问题频发,水环境恶化,水质降低[10]。长江中下游区域辽阔,因此本文在估算流失量的同时,综合冲刷、污染和河道三个过程进行合理地污染风险评估,以对研究区的地表氮磷污染进行重点区域识别。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

研究区位于我国东南部,地跨湖南、湖北、江西、安徽、江苏、浙江、上海六省一市(图 1)。该区域大部分处于长江中下游平原,总面积约为 9×10^6 km^2,海拔约为 5~100 m,年均温度约为 14~18 ℃,年降水量约为 1000~1500 mm。研究区属于亚热带季风气候,以冲积平原为主,具有较为优越的农业气候条件[11]。同时长江中下游地区是我国重要的粮、油、棉生产基地,亦为中国水资源最为丰富的地区, 主要河流有长江、汉江、赣江等[12]。大部分城市也是我国重要的工农业基地,是经济和科技文化发达地区,其中湖南、湖北、江苏省为我国的农业大省,农业生产活动较多[13]。双季稻是该区域的主要种植模式,水田亦是造成化肥流失的主要区域。

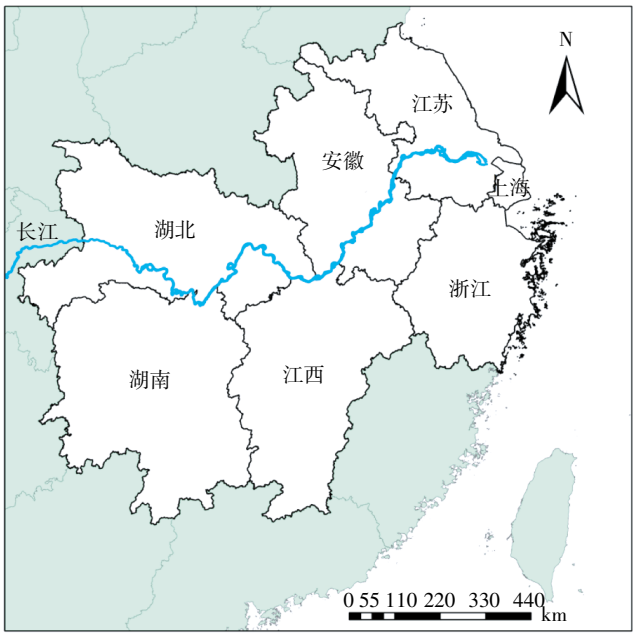

图 1　研究区地理位置

Figure 1　The location of study area

1.2　数据资料

本研究的基础数据资料主要包括市级行政单元划分、农作物播种面积、市级化肥施用数据、省级化肥施用数据、流失系数以及确定流失系数所需的相关数据。主要数据及来源见表 1。

1.3　方法介绍

1.3.1　化肥施用量及施用强度的估算方法

本研究从中国统计年鉴中获取了 2000—2015 年六省一市农田化肥的施用数据(市级)。有些年份或地区数据存在缺失,为了提高精确性和可利用性,选取了数据相对完善、年份较近的 2013 年数据进行化肥施用的空间分布特征分析。同时,对缺失数据进行估算,估算方法分为以下两种:

一是只存在化肥施用总量,无氮肥、磷肥和复合肥施用数据的市级行政区,采取以下公式进行估算:

$$\text{市级氮/磷肥施用量}(\times10^5\ \text{t})=\text{市级化肥施用量}\times\frac{\text{省级氮/磷肥施用折纯量}}{\text{省级化肥施用折纯量}} \quad (1)$$

二是部分 2013 年统计数据缺失的市级行政区,取相邻年份(2012、2014)的化肥施用数据的平均值进行替代。

表 1 应用数据及来源

Table 1 Data and sources

数据类型	来源	主要数据
市级行政单元	《中华人民共和国行政区划监测》	研究区共占 80 个市级行政区
农作物播种面积	《中国区域经济统计年鉴》	市级行政区主要作物播种面积及总播种面积
农田氮磷流失系数	《全国农业面源污染流失系数手册》	70 种模式下农田地表径流氮、磷流失系数[14]
流失系数分区数据	中国科学院资源环境科学数据中心	坡度[15]、农区[16]、水旱田[17]以及降雨[18]分布
降雨数据	中国科学院资源环境科学数据中心	年平均降雨量数据[18]
河网数据	中国科学院资源环境科学数据中心	河网长度、农区面积[19]
市级化肥施用数据	中国统计年鉴	农用化肥施用量(氮、磷、钾、复合肥)
省级化肥施用数据	中国统计局网站	农用化肥折纯量(氮、磷、钾、复合肥)

农田氮磷肥的总施用量包括单一元素肥料和复合肥中氮/磷有效成分之和。复合肥中氮磷钾有效成分采用通用型化肥比例 15:15:15 进行计算[20],即:

农田总施氮/磷量($\times10^5$ t)=氮/磷肥施用量+

复合肥施用量×15% (2)

化肥施用强度表示为单位市级行政区面积的年化肥施用量(kg·hm^{-2}·a^{-1}),相对于化肥施用总量更能直观地反映一个地区的化肥施用状况。计算公式为:

$$\text{氮/磷化肥施用强度}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})=\frac{\text{氮/磷化肥施用量}(\times10^5\text{ t})\times10^3}{\text{行政区面积}(\times10^3\text{ hm}^2)} \quad (3)$$

1.3.2 地表流失量及流失率的计算

本研究以农业部出版的《全国农业面源污染流失系数手册》中的农田地表径流流失系数为基础,对研究区 80 个市级行政区的农田氮磷流失系数进行查算。根据 5 个要素对各田块的流失系数进行划分,即“农区-地形-梯田/非梯田-旱地/水田-种植类型”(例如:模式 47 为“南方山地丘陵区-陡坡地-梯田-旱地-露地蔬菜”),获得的氮磷流失系数分别为 1.5%、0.85%。根据中国科学院资源环境科学数据中心获取到的数据,对研究区各种要素进行划分,从而查询《全国农业面源污染流失系数手册》获得各个模式的地表氮磷流失系数。并利用公式(4)将各个模式升尺度,获得各市级行政区的氮磷流失系数μ:

$$\mu=\sum_{i=1}^{n}\mu_i\cdot\beta_i \quad (4)$$

式中:β_i 为某一田块下某农作物种植面积占市级行政区农作物总播种总面积的比例,%;μ_i 为该田块的氮磷流失系数。

其中《全国农业面源污染流失系数手册》定义流失系数公式为:

$$\mu=\frac{RL-CK}{FA}\times100\% \quad (5)$$

式中:RL 为常规处理下,即正常施肥状态下氮/磷肥流失量,$\times10^5$ t;CK 为对照处理氮/磷肥的流失量,$\times10^5$ t;FA 为氮/磷肥的施用量,$\times10^5$ t。因此,氮磷肥的流失量可由流失系数与氮磷肥施用量相乘获得。

1.3.3 面源污染风险评价方法的构建

本文按照氮磷指数法的思路,构建农田面源污染风险方法评价,该方法是综合考虑了影响农业面源污染的主要因子,评价流域内不同地区发生氮磷流失危险性高低的一种方法[21]。该方法考虑三种影响氮磷流失过程的因子,即主要考虑冲刷过程(坡面迁移能力)、污染过程(污染物多少)和河道过程(造成水污染的可能性)。其中,冲刷过程主要考虑降雨因子,污染过程主要考虑氮磷流失量,河道过程主要考虑河网密度。降雨数据以研究区的年平均降雨量数据为准,氮磷流失量以本文计算为准,而河网密度则以水系数据为基础经简化计算获得(将河网长度除以行政区面积)。

面源农田污染风险等级构建如下:首先,市级行政区的农田氮磷流失量、河网密度、降雨等因素的数值进行归一化处理,见公式(6)和公式(7);其次,将各因子归一化的值相乘,计算氮磷潜在危险性指数,为了简化计算过程,本研究将各影响因子赋予相同的权重;最后,由高到低进行排序,并将各行政区的风险值分为若干等级,在此基础上识别面源污染风险的重点区域。

$$x_i^*=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}\quad i=1,2,\cdots,80 \quad (6)$$

评价值 r=源因子归一化值×Π 迁移因子归一化值 (7)

式中:x_i 为各个因子的实际值;$x_{\min}$ 为 80 个市级行政区中的最小值;$x_{\max}$ 为 80 个市级行政区中的最大值;x_i^* 为各个因子归一化处理后所得的值。最终得到相应的污染分级方案如表 2 所示。

2　结果与讨论

2.1 化肥施用的时空分布特征分析

2.1.1 化肥施用的时间变化特征

长江中下游地区六省一市施肥总量的时间变化趋势如图 2 所示。自 1996 年至 2015 年 20 年内,施肥总量波动不大,总体呈现上升趋势,施肥总量范围在 1.233×10^8~1.513×10^8 t 之间, 约占全国化肥施用总量的 30%。由此说明,研究区所处的六省一市一直为我国的农业中心。自 2011 年起,施肥总量达到 1.5×10^8 t,2015 年再次下降至 1.4×10^8 t, 这与 2014 年我国提出的适时开征化肥税引导农民减少化肥的过度施用有关[22]。其中,对于各类化肥施用来说,氮、磷、钾肥施用量基本保持不变,波动较小,氮、磷、钾、复合肥所占比例的均值分别为 47.97%、16.07%、9.67%、26.29%。可以看出,氮肥施用量最高,钾肥施用量最低,而复合肥施用呈现明显上升趋势。在农田化肥所含有的三种元素中,氮、磷仍是农田化肥所含的主要元素,也是造成农业面源污染的潜在关键元素,因此氮磷流失是本研究所要关注的重点内容[23]。同时,粮食产量自 2003 年至 2012 年呈现上升趋势, 至 2012 年粮食产量已达 1.508×10^9 t,而当年我国粮食总产量为 5.896×10^9 t,实现粮食产量“九连增”,而研究区粮食总产量约为全国的 25.58%[24]。同样的,2012 年至 2015 年研究区的粮食产量也呈现上升趋势,而 1996 年至 2003 年粮食产量呈现下降趋势。由此可以看出,化肥施用量的增加在一定程度上促进粮食增产,但化肥施用和粮食产量没有呈现完全的正相关,合理的化肥施用更能保障粮食产量和环境管理。

2.1.2 化肥施用的空间分布特征

长江中下游地区幅员辽阔,各个省市的社会经济和自然环境状况存在明显差异。因此,本研究利用地理信息系统进行空间分布特征分析,如图 3 所示。为了更直观地显示市级行政区的氮磷施用状况,采用化肥施用强度作为评估指标。对于氮肥施用强度来说,湖南省是施用强度最大的省份,东部地区都为高氮肥施用强度区, 西部地区处于较高氮肥施用强度地区;相比之下,江西省和上海市的大部分区域氮肥施用强度都处于较低水平;磷肥施用强度与氮肥施用强度呈现出明显差异。湖南省东部和湖北省的中部属于磷肥流失强度较高的区域,对这几个市级行政区依次排序为湘潭市>益阳市>常德市>宜昌市>岳阳市>襄樊市;而浙江省、江西省和上海市的大部分地区磷肥施用强度较低。综上所述,湖南省为六省一市中氮肥施用强度最大的省份,而磷肥施用强度较高的为湖南湖北两省的部分区域。因此,对于肥料施用控制管理,应具体位置具体分析,同一个省份不同市级单位的化肥施用量仍具有一定的差异。同时,上海市的氮磷施用强度

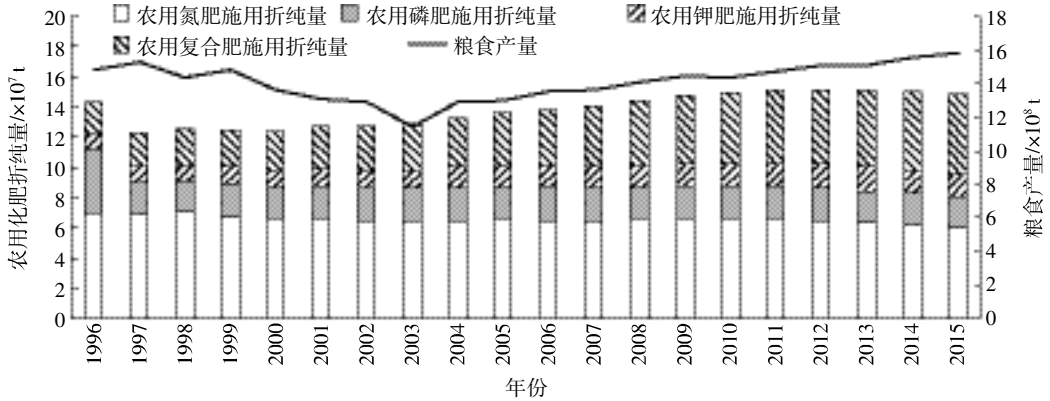

图 2　1996 年至 2015 年的化肥施用状况

Figure 2　The variation of fertilizers application from 1996 to 2015

表 2　农田氮磷污染风险分级方案

Table 2　The risk classification scheme for farmland nitrogen and phosphrus

项目	氮磷地表径流污染风险等级				
	低	较低	中	较高	高
氮/磷流失风险值(升序排列)	0~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	80%~100%

一直处于较低水平，这与上海城市化水平较高、农田面积比例较小有关。

2.2 农田化肥氮磷流失特征

不同的流失率将直接导致氮磷流失量的不同，农田化肥氮磷流失量的空间分布如图 4 所示。总体来说，湖南省是氮磷流失的主要区域。对于氮肥流失量，湖南省处于高流失量的市级行政区排序为：益阳市（7.66×10^3 t）>岳阳市（7.31×10^3 t）>衡阳市（7.16×10^3 t）>永州市（6.05×10^3 t）>长沙市（5.37×10^3 t）>邵阳市（5.26×10^3 t），其次湖南省的郴州市、株洲市、湘潭市以及湖北省的襄樊市和江苏省的徐州市、盐城市属于次高氮流失区；相比之下，江西省和浙江省的大部分区域和上海市都属于氮肥流失较少的区域。总体上来看，研究区氮肥流失量处于 0.521×10^3~1.214×10^3 t 范

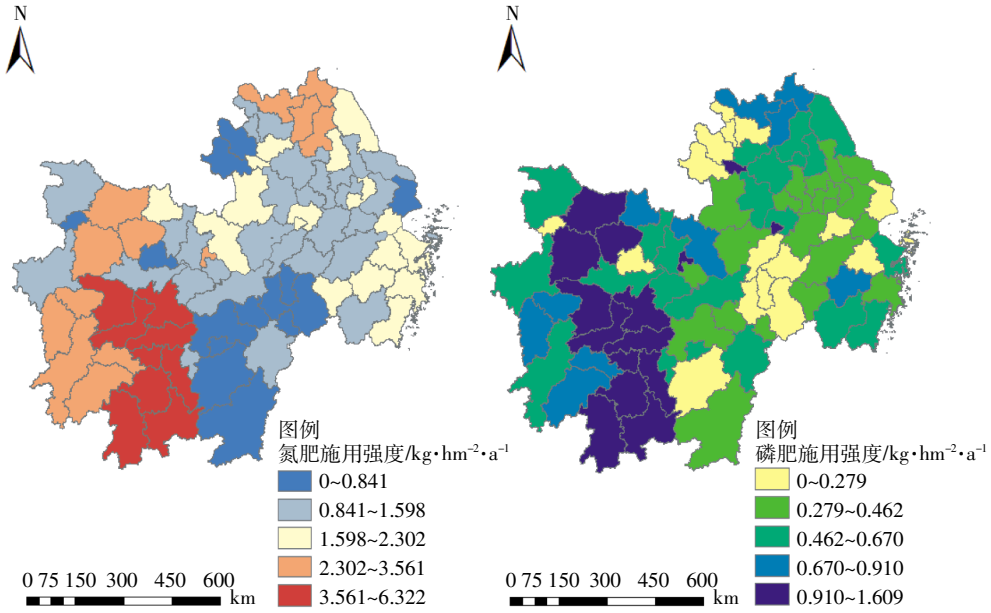

图 3 2013 年农田氮磷施用强度空间分布

Figure 3 The spatial distribution of nitrogen and phosphorus fertilizer intensity

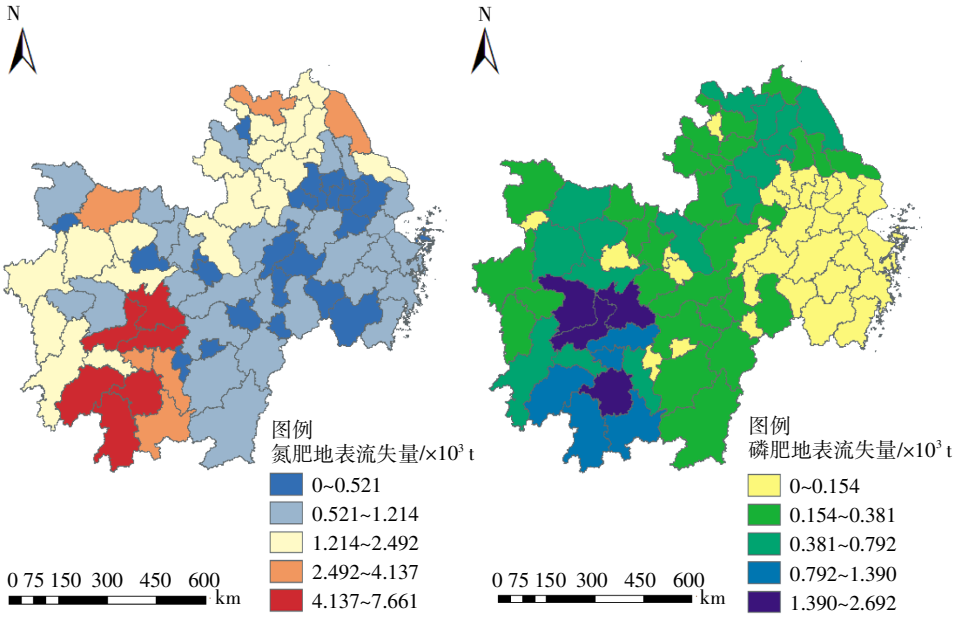

图 4 2013 年农田氮磷地表流失量的空间分布

Figure 4 The spatial distribution of the amount of nitrogen and phosphorus surface loss

围的居多。对于磷肥流失量,湖南省具有较高流失量的市级行政区排序为:常德市(2.69×10^3 t)>益阳市(1.97×10^3 t)>岳阳市(1.81×10^3 t)>衡阳市(1.73×10^3 t),湖南省的其他市级行政区磷流失量也属于较高水平;同时,其他五省一市的磷流失量基本小于 1000 t,尤其是浙江省的全部区域磷的流失量小于 200 t。总体上来看,研究区磷肥流失量处于 0.154×10^3~0.381×10^3 t 范围的居多。

氮磷流失强度分布如图 5 所示。对于氮肥施用强度来说,研究区流失强度的平均值为 2.41 kg·hm^{-2}·a^{-1};而湖南省大部分地区都属于氮肥流失强度较高地区,氮肥施用强度远高于平均水平,对这几个市级行政区依次排序为常德市>岳阳市>长沙市>株洲市>衡阳市>永州市>郴州市>娄底市>邵阳市,湖北省的襄樊市和宜昌市、江苏省的北部地区氮肥流失强度也处于较高水平;而江西省大部分地区氮肥流失强度都处于较低水平。对于磷肥施用强度,研究区流失强度的平均值为 0.61 kg·hm^{-2}·a^{-1}。与氮肥流失强度相同,湖南省大部分地区都属于磷肥流失强度较高地区,其中湖南省的东北部属于流失强度最高的地区,对这几个市级行政区依次排序为湘潭市>益阳市>常德市>岳阳市>长沙市>株洲市;而安徽省、江西省和江苏省的大部分地区磷肥流失强度较低。综上所述,湖南省为氮肥、磷肥流失强度最大的一个省份,同时氮肥、磷肥的流失强度在空间分布上稍有不同。这与不同地区的种植模式有关,也与氮磷元素在自然界中的形态有关,氮以溶解态为主,磷以吸附态为主,氮肥与磷肥相比更易流失[25]。

2.3 农田面源污染风险评估

利用 1.3.3 的方法对长江中下游地区六省一市开展农田面源污染重点区域识别,风险分级结果如图 6 所示。总体上来看,大部分高流失强度区域亦是高污染风险区,但有些区域,例如江苏省的苏州市,磷肥流失强度为 0.351 kg·hm^{-2}·a^{-1},却处于较高流失风险区,这与苏州市临近长江,河网密度较大有关。同时,氮磷地表流失污染存在着一定的空间差异,但湖南省中东部地区同时处于氮磷流失的高风险区,上海市和安徽省的北部地区同时处于氮磷流失的低风险区。对于农田氮污染风险分区,湖南省的 11 个市级行政单元、安徽省的铜陵市和芜湖市、江苏省的淮安市和宿迁市、湖北省的鄂州市属于高污染风险区;湖南省的其他地区均属于较高污染风险区,其他五省也均有分布;相比之下,上海市、安徽省北部和江西省的大部分地区都处于氮的低污染风险区;同时,高污染风险区约占研究区面积的 20.27%,湖南省高污染风险区约占总面积的 75.19%。对于磷地表径流污染风险分区,湖南省的 11 个市级行政单元、安徽省的安庆市和铜陵市、湖北省的鄂州市、江西省的南昌市属于高污染风险区;湖南省的其他地区均属于较高污染风险区,除浙江省外其他四省也均有分布;相比之下,上海市、安徽

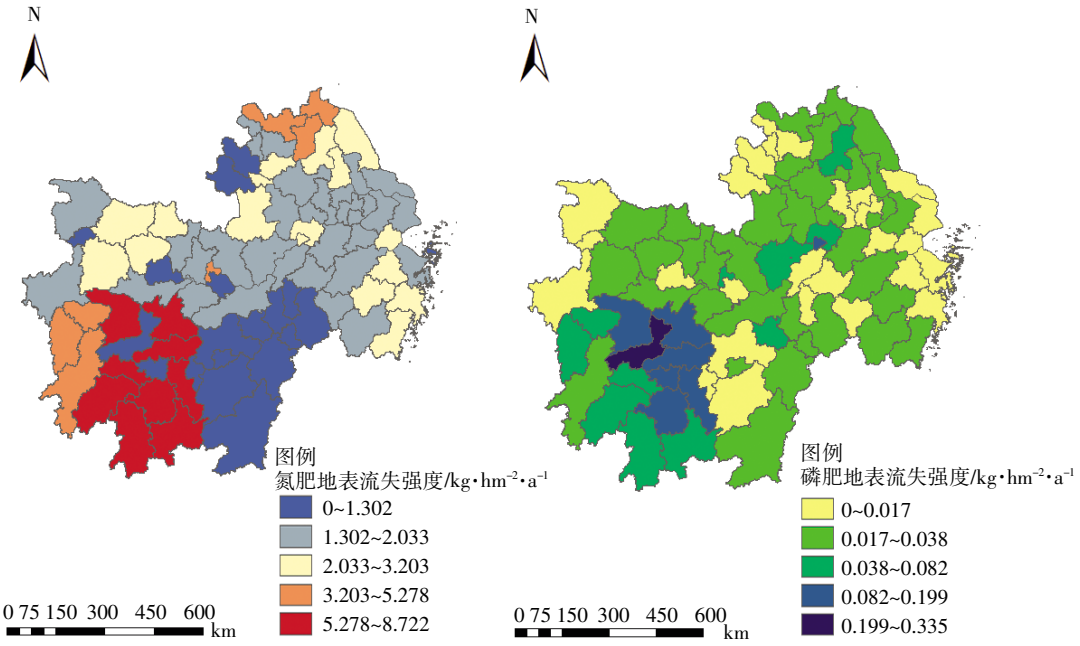

图 5　2013 年农田地表氮磷流失强度的空间分布

Figure 5　The spatial distribution of the nitrogen and phosphorus surface loss intensity

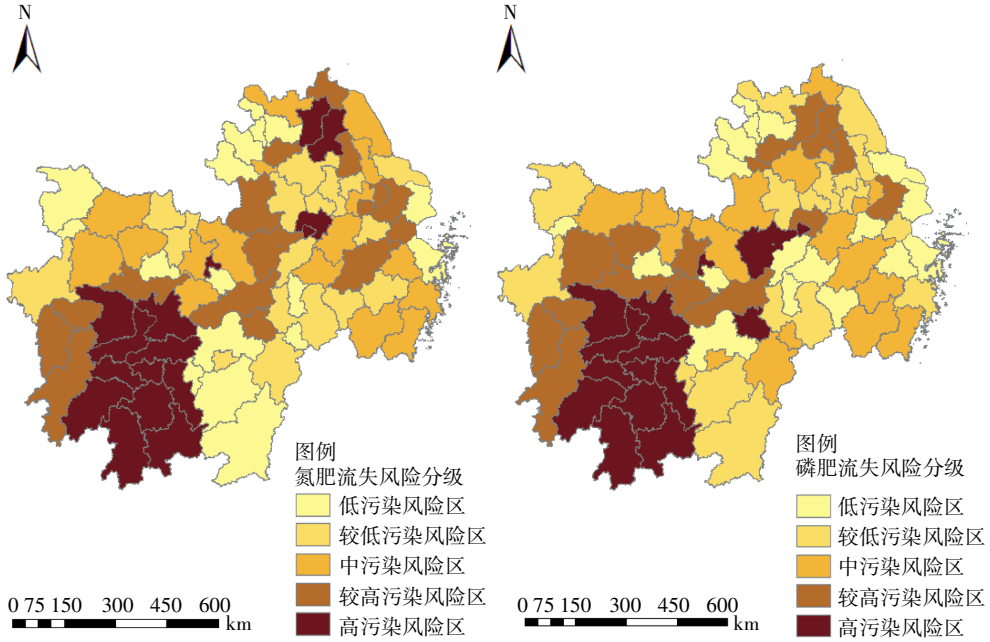

图 6 2013 年农田氮磷地表流失污染风险分级

Figure 6 The risk level of surface runoff loss of nitrogen and phosphorus fertilizer in 2013

省北部和南部、江西省东部部分区域处于氮的低污染风险区；同时，高污染风险区约占研究区面积的20.07%，湖南省高污染风险区与氮肥高污染风险区相同，约占总面积的 75.19%。综上所述，湖南省为氮磷流失的高风险区域，上海市为氮磷流失的低风险区域，其他五省以中、低污染风险为主。因此，长江中下游地区所处的六省一市污染防治宜“以防为主，以治为辅”，但对于湖南省的高污染风险区域应加强控制措施[12]。

3 结论

本研究以长江中下游所处的六省一市为研究区，调研了区域内市级行政区化肥数据及农作物播种面积，以农田氮磷流失系数为基础计算出对应的流失量，并利用地理信息系统进行了降雨量和河网密度的空间分析，确定了农田污染风险等级。该方法可直观地比较各市级行政区的氮磷流失量，识别农田污染高风险区，为农田面源防控和水环境治理提供理论基础。

案例研究结果表明，近 20 年来，研究区化肥施用量呈现上升趋势。湖南省是氮肥施用强度和流失强度最大的省份。湖南、湖北则为磷肥施用强度较高的区域，该区域氮磷流失强度的平均值分别为 2.41、0.61 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。从风险分级的角度，农业化肥对周边水体的高污染风险区为湖南省，上海市为低风险区域，其他五省则以中、低污染风险为主。

参考文献：

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259-273.

[2] 张嘉云, 李志鑫, 乔志远, 等. 我国农田化肥施用现状[J]. 北方农业学报, 2016, 44(3): 118-119.
ZHANG Jia-yun, LI Zhi-xin, QIAO Zhi-yuan, et al. The application status of farmland fertilizer in China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, 44(3): 118-119.

[3] 刘钦普. 江苏氮磷钾化肥使用地域分异及环境风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1477-1483.
LIU Qin-pu. Regional difference of NPK fertilizers application and environmental risk assessment in Jiangsu Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1477-1483.

[4] 向平安, 周 燕, 黄 璜, 等. 氮肥面源污染控制的绿税激励措施探讨——以洞庭湖区为例[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 330-337.
XIANG Ping-an, ZHOU Yan, HUANG Huang, et al. Discussion on the green tax stimulation measure of nitrogen fertilizer non-point source pollution control: Using the Dongting Lake area[J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2007, 40(2): 330-337.

[5] Wang A, Tang L H, Yang D W, et al. Spatio-temporal variation of net anthropogenic nitrogen inputs in the upper Yangtze River basin from 1990 to 2012[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(11): 1-13.

[6] 张俊卿. 密云水库流域森林植被对地表径流非点源污染的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
ZHANG Jun-qing. Effect of forest vegetation on the non-point source pollution of surface runoff in Miyun reservoir watershed[D]. Beijing:

Beijing Forestry University, 2008.

[7] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民. 不同降雨-径流过程中农业非点源污染研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(10):5-8.
FAN Li-li, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min. Agricultural non-point source pollution in different rainfall runoff[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(10):5-8.

[8] 杨宪龙, 同延安, 路永莉, 等. 农田氮肥利用率计算方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):2203-2212.
YANG Xian-long, TONG Yan-an, LU Yong-li, et al. Research advances in the calculating method of nitrogen use efficiency(NUE) in cultivated lands[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7):2203-2212.

[9] 刘　松, 朱建强, 田　皓. 长江中下游地区的主要水问题与对策[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(1):42-46.
LIU Song, ZHU Jian-qiang, TIAN Hao. The main water problem and measures in the middle and low of the Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze University(Nat Sci Edit)*, 2012, 9(1):42-46.

[10] 姚瑞华, 赵　越, 王　东, 等. 长江中下游流域水环境现状及污染防治对策[J]. 人民长江, 2014(增刊 1):45-47.
YAO Rui-hua, ZHAO Yue, WANG Dong, et al. Water environment situation and pollution measurements in the middle and low of the Yangtze River basin[J]. *Yangtze River*, 2014(Suppl 1):45-47.

[11] 赖　敏, 王伟力, 郭灵辉. 长江中下游城市群农业面源污染氮排放评价及调控[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(8):1-11.
LAI Min, WANG Wei-li, GUO Ling-hui. Nitrogen emissions evaluation and control of agricultural non-point source pollution in city group in the middle and low of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(8):1-11.

[12] 何书樵, 郑有飞, 尹继福. 近 50 年长江中下游地区降水特征分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7):1187-1192.
HE Shu-qiao, ZHENG You-fei, YIN Ji-fu. An analysis on precipitation characteristics over middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7):1187-1192.

[13] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 等. 全国农田面源污染流失系数手册[M]. 北京:中国农业出版社, 2015:8-77.
REN Tian-zhi, LIU Hong-bin, FAN Xian-peng, et al. Emission coefficient manual of agricultural non-point source pollution in China[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2015:8-77.

[14] 中国科学院资源环境科学数据中心. 地形地貌数据库[DB/OL]. [2017-06-01]. http://www.resdc.cn.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinse Academy of Science(RESDC). Topography database[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.

[15] 中国科学院资源环境科学数据中心. 自然地理分区数据库[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinse Academy of Science(RESDC). Natural geographical partition database[DB/OL]. [2017-06-01]. http://www.resdc.cn.

[16] 中国科学院资源环境科学数据中心. 土地利用数据库[DB/OL]. [2017-06-01]. http://www.resdc.cn.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinse Academy of Science(RESDC). Land use database[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.

[17] 中国科学院资源环境科学数据中心. 中国气象要素空间插值数据库[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinse Academy of Science(RESDC). China meteorological elements spatial interpolation database[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.

[18] 中国科学院资源环境科学数据中心. 全球 100 万基础地理数据库[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.
Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinse Academy of Science(RESDC). Global 1:1000000 Fundamental geographic database[DB/OL].[2017-06-01]. http://www.resdc.cn.

[19] 张卫峰, 李亮科, 陈新平, 等. 我国复合肥发展现状及存在的问题[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(2):14-16.
ZHANG Wei-feng, LI Liang-ke, CHEN Xin-ping, et al. The present status and existing problems in China's compound fertilizer development[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2009, 24(2):14-16.

[20] 张　平, 高阳昕, 刘云慧, 等. 基于氮磷指数的小流域氮磷污染风险评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(增刊 1):1018-1025.
ZHANG Ping, GAO Yang-xin, LIU Yun-hui, et al. Nitrogen and phosphorus pollution risk assessment in small catchment based on the nitrogen and phosphorus index[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(Suppl 1):1018-1025.

[21] 熊冬洋. 对我国适时开征化肥税的思考[J]. 税务与经济, 2014(2):97-100.
XIONG Dong-yang. Reflection on timely taxation in China[J]. Taxation and Economy, 2014(2):97-100.

[22] 程　波, 张　泽, 陈　凌, 等. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊 1):118-124.
CHENG Bo, ZHANG Ze, CHEN Ling, et al. Eutrophication of Taihu Lake and pollution from agricultural non-point sources in Lake Taihu Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl 1):118-124.

[23] 胡传景. 粮食产量九连增耕地保护不能松[J]. 浙江国土资源, 2013(3):43-46.
HU Chuan-jing. The increasion of food production in nine years, strict enforcement of the cultivated land protection[J]. *Land and Resources of Zhejiang Province*, 2013(3):43-46.

[24] Otto R, de Freitas Júnior J C M, Zavaschi E, et al. Combined application of concentrated vinasse and nitrogen fertilizers in sugarcane: Strategies to reduce ammonia volatilization losses[J]. *Sugar Tech*, 2017, 19(3):248-257.