中国生态农业学报 2018 年 12 月 第 26 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2018, 26(12): 1887−1897

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180118

康智明, 张荣霞, 叶玉珍, 吴仁烨, 王松良. 基于 GIS 的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1887−1897
KANG Z M, ZHANG R X, YE Y Z, WU R Y, WANG S L. GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1887−1897

基于 GIS 的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估*

康智明[1,2], 张荣霞[1], 叶玉珍[3], 吴仁烨[1], 王松良[1**]

(1. 福建农林大学作物科学学院/福建省农业生态过程与安全监控重点实验室 福州 350002; 2. 福建省金梭椤生态文明研究所 福州 350002; 3. 福建省明溪县城郊农业技术推广站 明溪 365200)

摘 要: 为了掌握福建省农田氮磷地表径流流失特征, 以福建省的 9 个地级市为研究边界, 通过对其辖区 1985—2016 年间农田氮、磷化肥施用量的调查, 计算农田化肥氮磷的地表径流流失量, 并在耦合农田化肥地表径流流失量、降雨和河网密度 3 个因素的基础上, 分析福建省各地级行政区域农田化肥氮磷的污染风险等级, 应用地理信息系统(GIS)分析其氮、磷污染的空间分布。结果表明: 32 年间福建省化肥施用量由 4.911×10^5 t 增加到 1.239×10^6 t, 年均增长 3.03%; 漳州市氮肥和磷肥的施用强度最大, 分别达 880.40 kg·hm^{-2} 和 429.21 kg·hm^{-2}; 氮磷地表流失量较高的区域主要集中在漳州市, 其氮、磷地表流失强度分别达 8.71 kg·hm^{-2} 和 1.99 kg·hm^{-2}。从氮、磷污染风险等级看, 南平市氮、磷肥的流失风险值均最高, 分别达 63.19%和 63.37%, 属于高氮磷污染风险区域; 厦门市氮、磷肥的流失风险值均最低, 分别为 0.53%和 0.53%, 属于低污染风险区域; 其他市处于两者之间。可见, 漳州市农业发展中应注重氮、磷肥的减量化; 南平市则注重对农田氮、磷地表径流流失的风险防范; 全省应加大力度发展生态农业, 以助力福建省生态文明先行示范区、生态文明试验区的建设。

关键词: 福建; 氮磷化肥施用量; 农业面源污染; 氮磷地表径流; 氮磷污染风险
中图分类号: X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)12-1887-11

GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province*

KANG Zhiming[1,2], ZHANG Rongxia[1], YE Yuzhen[3], WU Renye[1], WANG Songliang[1**]

(1. College of Crop Science, Fujian Agriculture and Forestry University / Fujian Provincial Key Laboratory of Agroecological Processing and Safety Monitoring, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Thoreau Institute of Ecological Civilization, Fuzhou 350002, China; 3. Agricultural Technology Extension Station of Chengjiao Town, Mingxi County, Mingxi 365200, China)

Abstract: Nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmlands has been the main cause of water eutrophication. Fujian Province is one of the regions with the highest intensity of fertilizer application per unit area of land in China. The subtropical

* 福建省社科规划项目(FJ2018B070)、福建农林大学国际科技合作与交流项目(KXb16017A)和福建农林大学科技创新专项基金项目(KFA17163A)资助
** 通信作者: 王松良, 主要研究方向为农业生态学、农业生态系统管理。E-mail: wsoloedu07@126.com
康智明, 主要研究方向为农田面源污染评价、重金属污染评价。E-mail: kangzhiming56@163.com
收稿日期: 2018-01-25 接受日期: 2018-07-20
* This work was supported by the Social Science Planning Project of Fujian Province (FJ2018B070), the International Sci-tech Collaboration & Communication Project of Fujian Agriculture and Forestry University (KXb16017A) and the Sci-tech Innovation Fund Project of Fujian Agriculture and Forestry University (KFA17163A).
** Corresponding author, E-mail: wsoloedu07@126.com
Received Jan. 25, 2018; accepted Jul. 20, 2018

monsoon climate zone and hilly region with heavy summer and autumn rains on steep hill-slope farmlands in Fujian increase the risk potential for pollution. Thus to analyze current conditions and characteristics of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland in Fujian Province, we selected nine prefectural level cities in Fujian Province as the study areas to estimate the loss of nitrogen and phosphorus in surface runoff in farmlands based on investigated data of fertilizer use in the cities for the period from 1985 to 2016. By integrating the three factors of pollution risk (fertilizer loss, rainfall and drainage intensity), we evaluated nitrogen and phosphorus pollution risk from farmland fertilizer to determine critical areas of primary concern. We used the ArcGIS platform to make thematic maps for visualizing the spatial distribution of contaminated areas by nitrogen and phosphorus. The results showed that fertilizer application in Fujian Province increased during the 30-year period from 4.911×10^5 t to 1.239×10^6 t, with an annual average rate of increase of 3.03%. The amount of fertilizer use in Fujian Province was highest (1.243×10^6 t) in 1999, accounting for 3.01% of total fertilizer use in China. The intensities of nitrogenous and phosphate fertilizer use in Zhangzhou City were largest, with respective values of 880.40 $kg\cdot hm^{-2}$ and 429.21 $kg\cdot hm^{-2}$. The high nitrogen and phosphorus surface runoff were concentrated in Zhangzhou City, which were respectively 1.571×10^6 t and 3.590×10^5 t, with nitrogen and phosphorus loss intensities of 8.71 $kg\cdot hm^{-2}$ and 1.99 $kg\cdot hm^{-2}$. However, pollution risk values of nitrogen and phosphate fertilizer were highest in Nanping City, reaching respectively 63.19% and 63.37% — a high risk of nitrogen and phosphorus pollution. Xiamen City had the lowest risk values, respectively 0.53% and 0.53%. The others were in between and in the following decreasing order: Ningde City (57.22% and 54.48%) > Sanming City (53.34% and 53.34%) > Longyan City (51.38% and 51.20%) > Zhangzhou City (46.73% and 46.73%) > Quanzhou City (45.49% and 40.25%) > Fuzhou City (34.35% and 33.80%) > Putian City (18.59% and 16.93%). By using cluster analysis, these nine cities were divided into three groups — heavy to moderate pollution risk (Sanming City, Longyan City, Ningde City and Nanping City), moderate to light pollution risk (Quanzhou City, Zhangzhou City and Fuzhou City) and low pollution risk (Xiamen City and Putian City). We concluded that Zhangzhou City needed to emphasize on reducing nitrogen and phosphorus fertilizer use in agriculture. Nanping City needed to hammer at risk control of nitrogen and phosphorus loss in farmlands. The others cities needed to strengthen the development of ecological agriculture to facilitate the construction of Fujian Experimented Region of Ecological Civilization and the promotion and optimization of control measures of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff.

Keywords: Fujian Province; Nitrogen and phosphorus fertilizers application rates; Non-point source pollution; Nitrogen and phosphorus surface runoff; Nitrogen and phosphorus pollution risk

氮磷污染问题可以分为点源污染和面源污染，其中面源污染具有随机性强、成因复杂、潜伏周期长等特点[1-2]。同时，由于农业活动具有广泛性和普遍性，使其成为面源污染重要的构成因素。近几年来，随着我国城镇化的快速扩张，人均耕地面积逐渐减少，单位土地资源面积超强度利用，以致施用化肥成为粮食增产的重要保障措施。据统计，2013 年全球化肥施用总量达 1.67 亿 t；同年我国农业化肥施用总量达 0.59 亿 t，约占全球化肥使用总量的 35.33%[3]；我国单位面积化肥施用量超过世界平均水平 3 倍多[4]。目前，农业面源污染主要由施肥不当或过量施肥所引起，对中国农业面源污染的评估和治理迫在眉睫。

有研究表明，当农田含有过多氮、磷元素时，在降雨过程中这些营养元素容易随地表径流进入受纳水体(江、河、湖、海)，或随地下淋溶进入土壤，从而引起水体富营养化和土壤污染等农业面源污染问题[5-7]。由于受山地地形影响，地表径流成为我国南方地区氮磷流失的主要途径。因此有效控制地表径流成为遏制农田氮、磷流失的重要途径[8-10]。在 2016 年中央“一号文件”中明确提出进一步加大农业面源污染防治力度和实施化肥农药零增长行动。因此，通过对农田化肥施用情况的调研和对地表径流氮磷流失的估算与评价，将有助于有效防范农田面源污染风险。目前，有关地表径流氮磷流失的研究主要集中于微观尺度的研究，如吕玉娟等[11]基于花生地和橘园地的监测数据，分析了红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征；陈颖等[12]通过田间实测方法，研究了海河流域水稻田氮磷元素地表径流流失特征；向速林等[13]通过在赣江下游水稻田示范基地设置监测点，研究了常规施肥条件下水稻田生态系统地表径流中氮磷养分的流失特征。然而，对于地表径流氮磷流失在中宏观尺度上的研究较少，尤其是在省级区域层面的研究尚鲜见报道。同时，福建省作为我国极具特色的亚热带红壤丘陵型农业基地之一，也是我国单位土地面积化肥施用量最高的区域之一，存在严峻的农业面源污染问题，江河水体富营养事件频发[14]。因此，本文以福建省 9 个地级市为研究边界，通过调查和分析 1985—2016 年农田氮磷肥施用量和地表径流流失特征，并在耦合氮磷肥地表径流流失量、降雨和河网密度等 3 种因素的基础上，分析其农田化肥氮磷的污染风险等级，同时利用地理信息系统(GIS)分析，直观展示氮磷污染区域的空间分布特征。本文通过对福建省开展农业

氮磷地表径流流失估算和风险区域识别研究，可为福建省农业面源污染治理和管控提供数据支撑，从而助力福建省生态文明先行示范区和生态文明试验区的建设。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

福建省位于我国东南沿海，属于南方山地丘陵区，九成陆地面积为丘陵地带，被称为“八山一水一分田”。属于亚热带海洋性季风气候，热量丰富，平均降雨量 1 400~2 000 mm，是中国雨量最丰富的省份之一。现有 9 个地级市，分别为福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市、龙岩市、三明市、南平市和宁德市(图 1)。全省共有闽江、九龙江、晋江、交溪、木兰溪、汀江等主要河流。

1.2　数据资料

本研究的基础数据资料包括福建省 9 个地级市农作物播种面积、化肥施用总量、流失系数以及确定流失系数所需的相关数据。具体数据及来源见表 1。

1.3　研究方法

1.3.1　化肥施用量与施用强度的估算方法

本研究从福建省统计年鉴中获得 1985—2016 年福建省农田化肥的施用数据，并分析其时间动态变化规律。同时，从中选取数据相对完善、年份最近的 2015 年数据进行化肥施用的空间分布特征分析。

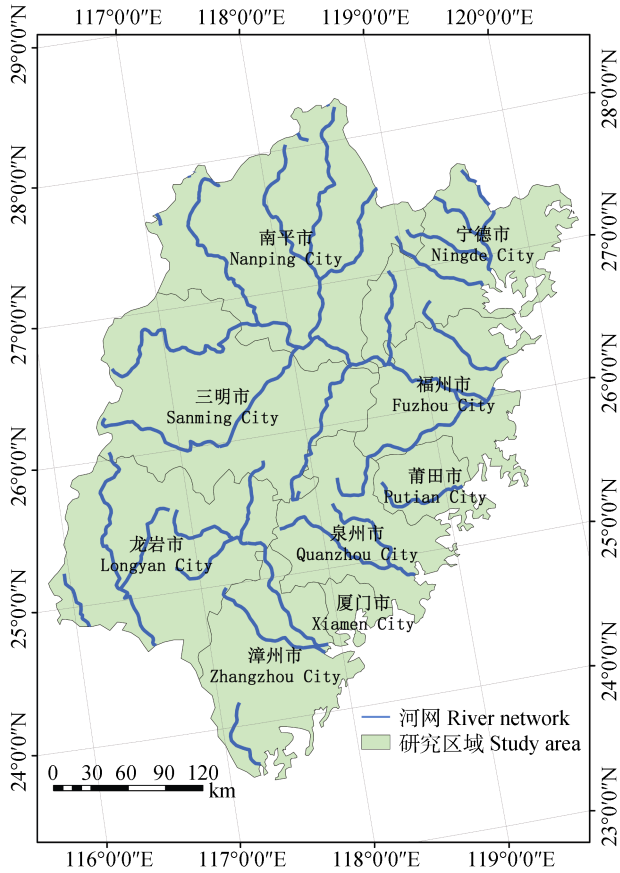

图 1　研究区域与河网地理位置

Fig. 1　Location of the study area and its river network

表 1　研究基础数据的类型及其来源

Table 1　Data used in the study and their sources

数据类型 Data type	来源 Sources	主要数据 Main data
农作物播种面积 Crop sowing area	各市级行政区《统计年鉴》 Statistical Yearbook of the cities	主要农作物播种面积 Sowing area of the main crops
农田氮磷流失系数 Loss coefficients of nitrogen and phosphorus in farmland	《全国农业面源污染流失系数手册》 Handbook of Farmland Non-point Source Pollution Emission Coefficient in China	地表径流流失系数[15] Loss coefficient of surface runoff[15]
流失系数分区数据 Partition data of loss coefficient	中国科学院资源环境科学数据中心 Data Center for Resource and Environmental Sciences in Chinese Academy of Sciences	坡度、农区、水旱田[12] Slope, agricultural area, and farmland
降雨数据 Rainfall	各市级行政区《统计年鉴》 Statistical Yearbook of the cities	年平均降雨量数据 Annual average rainfall data
河网数据 River net	中国科学院资源环境科学数据中心 Data Center for Resource and Environmental Sciences in Chinese Academy of Sciences	河网长度[16] River network length[16]
市级化肥施用数据 Fertilizer application in city level	各市级行政区《统计年鉴》 Statistical Yearbook of the cities	化肥施用折纯总量 Total amount of fertilizer application
省级化肥施用数据 Fertilizer application in provincial level	福建省统计年鉴 Statistical Yearbook of Fujian Province	化肥施用折纯总量 Total amount of fertilizer application

农田氮磷肥总施用量由单一元素肥料和复合肥料相加而成，即：

$$\text{农田总施氮(磷)量}=\text{氮(磷)肥施用量}+\text{复合肥施用量}\times 15\% \quad (1)$$

式中，复合肥采用通用型(N：P：K=15：15：15)计算[3]。

化肥施用强度由单位耕地面积的年化肥施用量($kg·hm^{-2}·a^{-1}$)计算[3]而得。

1.3.2 地表流失量与流失率的计算方法

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，对福建省 9 个地级市的农田氮磷流失系数进行查算。同时，参考孙铖等[3]构建的方法，利用下列公式将各个模式升高尺度，获得各市级行政区的氮磷流失系数(μ):

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \mu_i \times \beta_i \tag{2}$$

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:

$$\mu_i = \frac{\mathrm{RL}_i - \mathrm{CK}_i}{\mathrm{FA}_i} \times 100\% \tag{3}$$

式中：RL 为常规处理下，即正常施肥状态下氮/磷肥流失量；CK 为对照处理氮/磷肥流失量；FA 为氮/磷肥的施用量。

研究区域氮(磷)肥流失量计算公式为:

氮(磷)肥流失量=流失系数×氮(磷)肥总施用量 (4)

1.3.3 面源污染风险评价指标体系的构建

利用孙铖等[3]构建的评价指标体系，综合考虑影响农业面源污染的主要因子，即冲刷过程、污染过程和河道过程。其中，冲刷过程主要影响因子为降雨量，污染过程主要影响因子为氮磷流失量，河道过程主要影响因子为河网密度。降雨数据为统计年鉴中各地级市的年平均降雨量，氮磷流失量为公式(4)计算所得，河网密度则以河网长度除以行政区面积而得。最终得到相应的污染风险方案等级，如表 2 所示。

为了简化过程，本研究将各影响因子赋予相同的权重，即:

氮/磷流失风险值=降雨值×1/3+氮/磷流失量×1/3+河网密度×1/3 (5)

式中：降雨值、氮/磷流失量和河网密度为归一化处理值[3]。

表 2 农田氮磷污染风险分级方案

Table 2 Risk classification scheme for farmland nitrogen and phosphorus pollution

风险等级 Risk class	低 Lower	较低 Low	中 Moderate	较高 High	高 Higher
风险值 Risk value (%)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100

2 结果与分析

2.1 研究区域化肥施用的时空分布特征

2.1.1 化肥施用的时间变化特征

福建省 9 地市施肥总量的时间变化趋势如图 2 所示。1985—2016 年 32 年内，福建省施肥总量总体呈上升趋势，由 1985 年的 4.911×10^5 t 增加到 2016 年的 1.239×10^6 t。其中，1985—1999 年全省施肥总量逐年快速增长，1999 年达到最高点，为 1.243×10^6 t，约占当年全国化肥施用总量的 3.01%；此后，2000 年至 2001 年，福建省化肥施用总量有微小下降趋势，

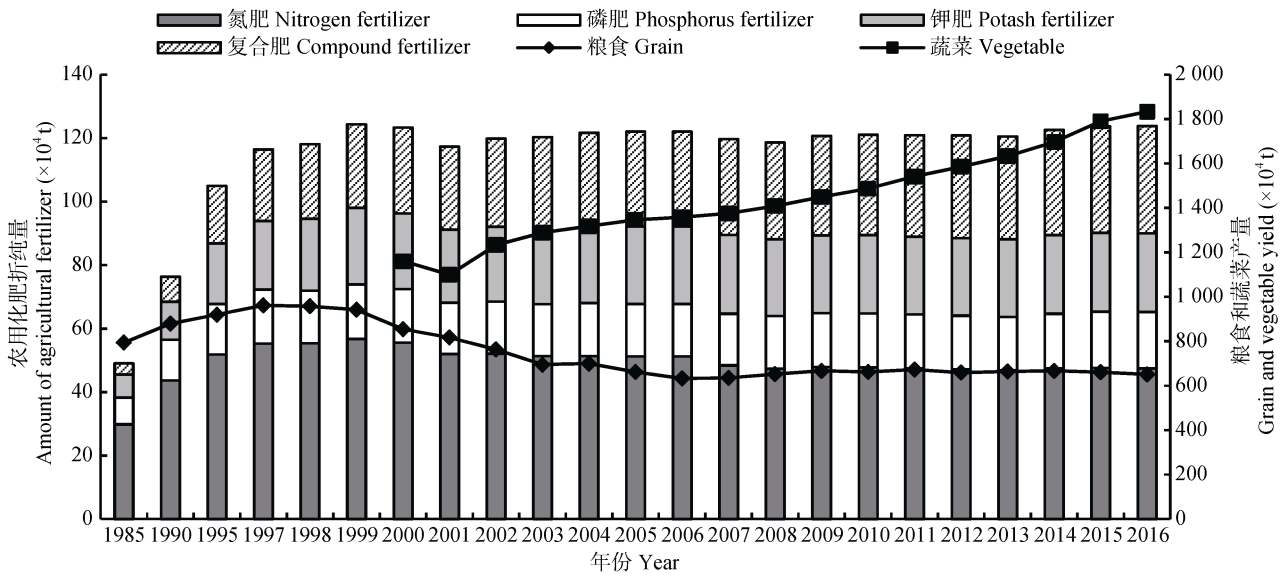

图 2 1985—2016 年福建省化肥施用量及粮食、蔬菜产量变化

Fig. 2 Changes of fertilizer application quantity and grain and vegetable yields in Fujian Province from 1985 to 2016

2001 年达到最低值(1.174×10^4 t)，这可能与 2000 年以来，福建省开始致力“生态省”建设，政府主动引导农民减少化肥用量有关。但是 2002—2016 年，福建省的化肥施用量逐年有回升趋势。对于各类化肥施用来说，氮肥、磷肥、钾肥和复合肥所占比例的均值分别为 43.55%、14.23%、19.43%和 22.78%。可以看出，氮肥施用量最高，磷肥施用量最低，而复合肥施用量呈逐步上升趋势。自 1985 年起，福建省粮食产量逐渐上升，在 1997 年达最大值，为 9.618×10^6 t；随后全省粮食产量趋于稳定，2016 年达 6.509×10^6 t。值得注意的是，2000 年粮食产量下降的同时，福建省蔬菜产量快速提高，由 1.161×10^7 t 上升到 2016 年的 1.833×10^7 t，17 年间产量增长 6.723×10^6 t。由此可以得出，增加化肥施用可在一定程度上促进粮食和蔬菜的增产。

2.1.2　化肥施用的空间分布特征

各市级行政区的氮磷施用状况如图 3 所示。对于氮肥施用强度来说，福建省东南沿海地区的施用强度大于西北山区。其中，漳州市氮肥施用强度最大，达 880.40 kg·hm^{-2}；其次是泉州市、南平市、莆田市、宁德市、龙岩市、三明市和福州市，分别为 610.43 kg·hm^{-2}、448.01 kg·hm^{-2}、390.52 kg·hm^{-2}、319.00 kg·hm^{-2}、295.45 kg·hm^{-2}、270.24 kg·hm^{-2} 和 253.17 kg·hm^{-2}；而厦门市氮肥施用强度最小，仅有 224.70 kg·hm^{-2}。对于磷肥施用强度来说，福建省东南沿海地区的施用强度依然大于西北山区，但与氮肥施用强度分布的地级市有明显差异。其中，漳州市磷肥施用强度最大，达 429.21 kg·hm^{-2}；其次是南平市、泉州市、莆田市、厦门市、三明市、龙岩市和宁德市，分别为 206.46 kg·hm^{-2}、177.99 kg·hm^{-2}、144.52 kg·hm^{-2}、136.85 kg·hm^{-2}、136.07 kg·hm^{-2}、133.46 kg·hm^{-2} 和 114.63 kg·hm^{-2}；福州市磷肥施用强度最小，仅有 109.01 kg·hm^{-2}。

对氮、磷肥施用强度进行聚类分析发现，当欧式距离等于 10 时，福建省 9 个地级市被划分为 3 大类，其中漳州市单独一类，莆田市、南平市和泉州市归一类，其他 5 个地级市归一类。通过施肥强度数据对比，漳州市属于高氮、高磷肥施用强度地区，这与该地区历来农业的集约发展现实相关。

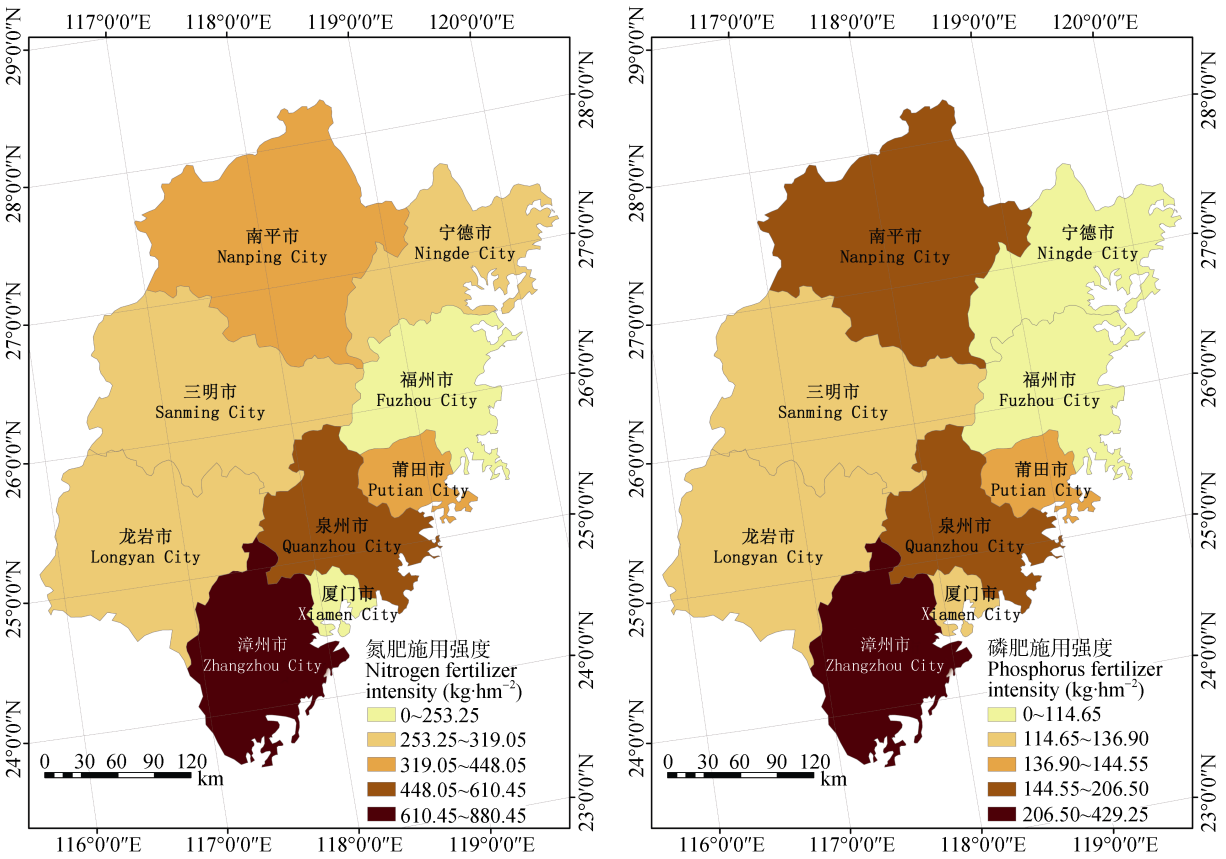

图 3　2015 年福建省农田氮磷肥施用强度空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of nitrogen and phosphorus fertilizers intensities in Fujian Province in 2015

2.2　农田化肥氮磷流失特征

福建省农田化肥氮磷地表径流流失(以下简称“氮磷流失”)量的空间分布如图 4 所示。总体来说，福建省氮磷流失主要集中于漳州市、泉州市和南平

市。其中，漳州市的氮肥流失量最大，达 1.571×10^6 kg；其次是泉州市、南平市、三明市、龙岩市、宁德市、福州市和莆田市，分别为 8.920×10^5 kg、8.480×10^5 kg、5.580×10^5 kg、5.200×10^5 kg、4.780×10^5 kg、4.110×10^5 kg 和 3.070×10^5 kg；而厦门市氮肥流失量最小，仅有 4.700×10^4 kg。总体而言，福建省氮肥流失量处于 3.070×10^5~1.571×10^6 kg。同时，漳州市磷肥流失量也最大，达 3.590×10^5 kg；其次是南平市、泉州市、三明市、龙岩市、福州市、宁德市和莆田市，分别为 1.980×10^5 kg、1.520×10^5 kg、1.370×10^5 kg、1.200×10^5 kg、9.200×10^4 kg、8.400×10^4 kg 和 5.700×10^4 kg；而厦门市磷肥流失量最小，仅有 1.600×10^4 kg。总体而言，福建省磷肥流失量处于 5.700×10^4~3.590×10^5 kg。

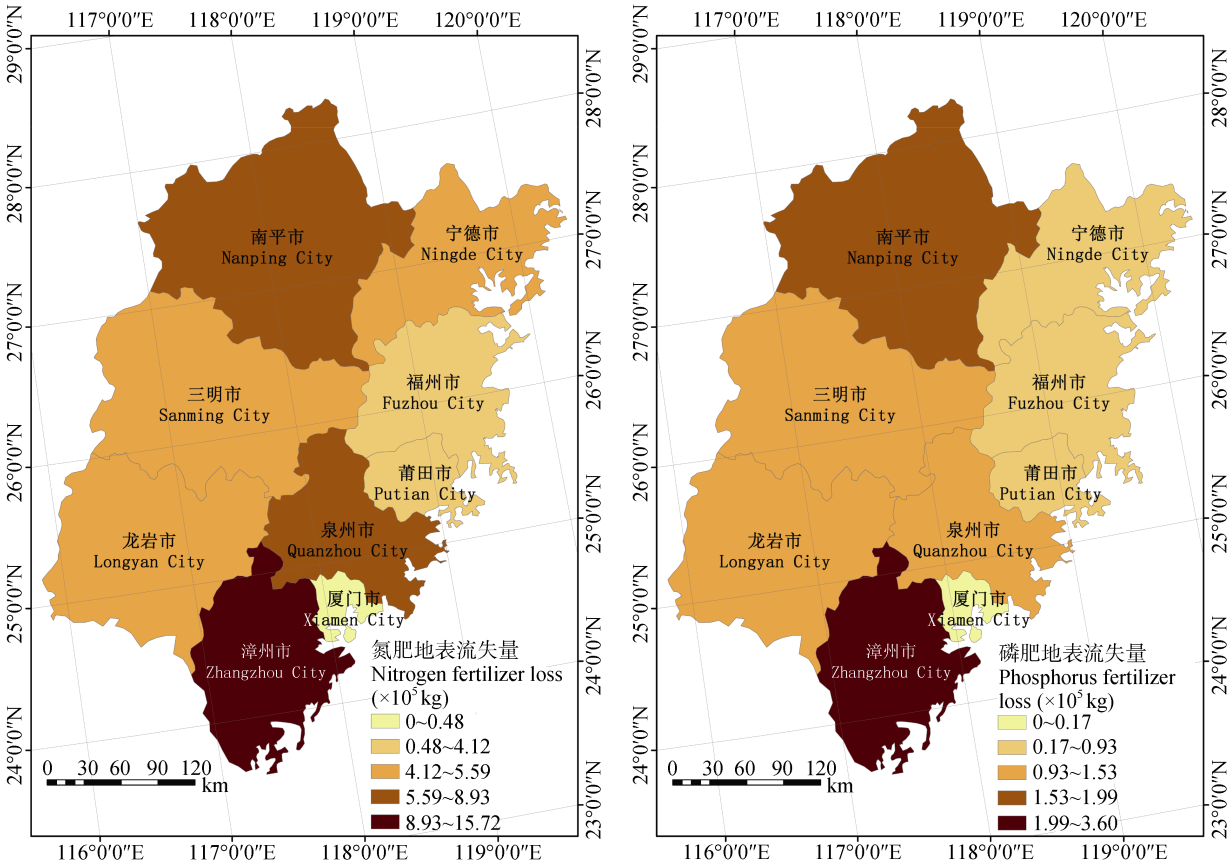

图 4 2015 年福建省农田氮磷地表径流流失量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of amounts of nitrogen and phosphorus surface runoff loss in Fujian Province in 2015

福建省平均氮肥流失强度为 4.39 kg·hm^{-2}，其中，漳州市、泉州市和南平市属氮肥流失强度较高地区，分别达 8.71 kg·hm^{-2}、6.83 kg·hm^{-2} 和 5.41 kg·hm^{-2}，高于全省平均水平；其次是莆田市、宁德市、龙岩市、三明市和福州市，分别为 3.93 kg·hm^{-2}、3.47 kg·hm^{-2}、3.17 kg·hm^{-2}、2.86 kg·hm^{-2} 和 2.74 kg·hm^{-2}；厦门市氮肥流失强度最小，仅有 2.42 kg·hm^{-2}(图 5)。

福建省平均磷肥流失强度为 0.95 kg·hm^{-2}，其中，漳州市、南平市和泉州市属于磷肥流失强度较高地区,分别达 1.99 kg·hm^{-2}、1.26 kg·hm^{-2} 和 1.16 kg·hm^{-2}，高于平均水平；其次是厦门市、莆田市、龙岩市和三明市，分别为 0.80 kg·hm^{-2}、0.73 kg·hm^{-2}、0.73 kg·hm^{-2} 和 0.70 kg·hm^{-2}；宁德市和福州市氮肥流失强度最小，均为 0.61 kg·hm^{-2}(图 5)。由此可见，漳州市是福建省氮磷流失强度最大的地级市。

对氮、磷流失量和流失强度进行聚类分析发现，当欧式距离等于 5 时，福建省 9 个地级市被划分为 4 大类，其中漳州市单独归一类，厦门市单独归一类，南平市和泉州市归一类，其他 5 个地级市归一类。通过数据对比，可见漳州市属于高氮、磷肥流失地区，这与该地区高施肥量有关。而厦门市属于低氮、磷肥流失地区，这可能与其城市化水平较高、农业产值比例较低有关。

2.3 农田面源污染风险评估

福建省氮磷地表流失污染风险值的空间分布如图 6 所示。总体来说，福建省大部分地区处于氮磷地表流失中度污染风险水平。其中，南平市的氮肥流失污染风险值最大，达 63.19%，属较高风险水平；

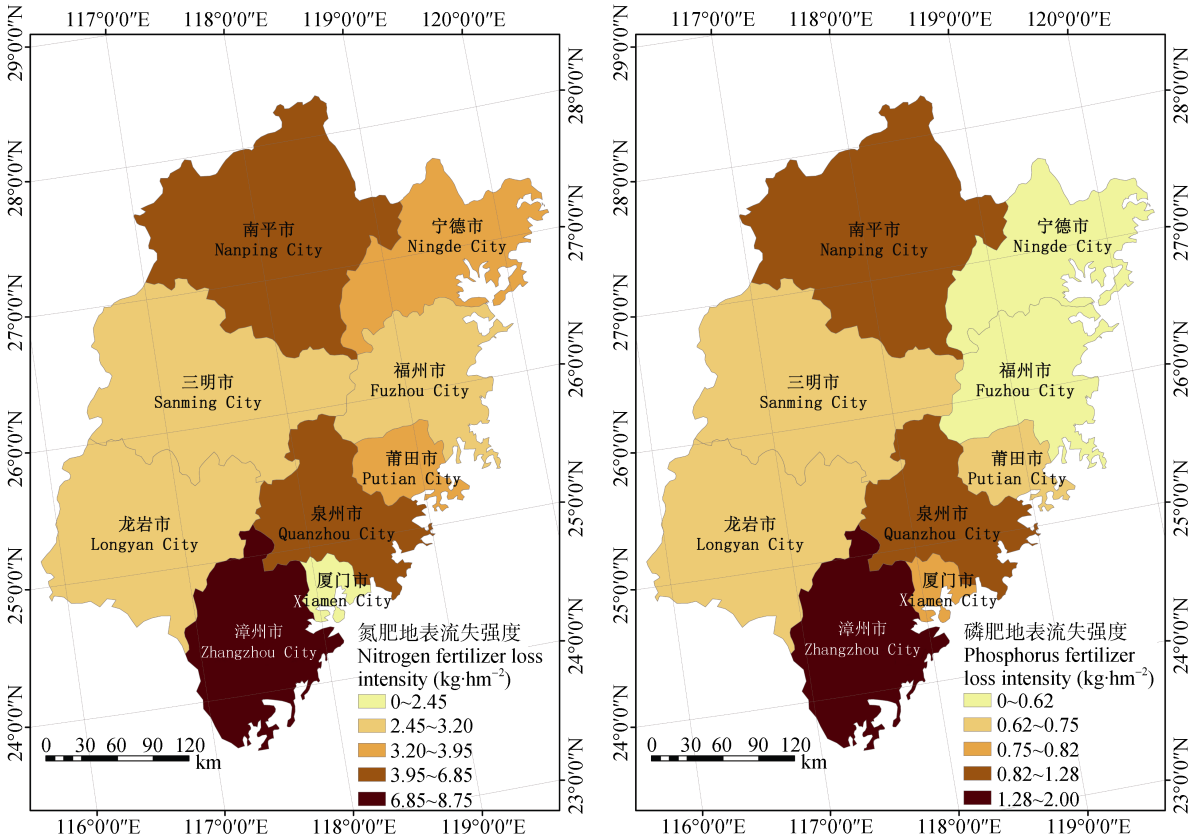

图 5　2015 年福建省农田地表氮磷地表径流流失强度空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of nitrogen and phosphorus fertilizer surface runoff loss intensities in Fujian Province in 2015

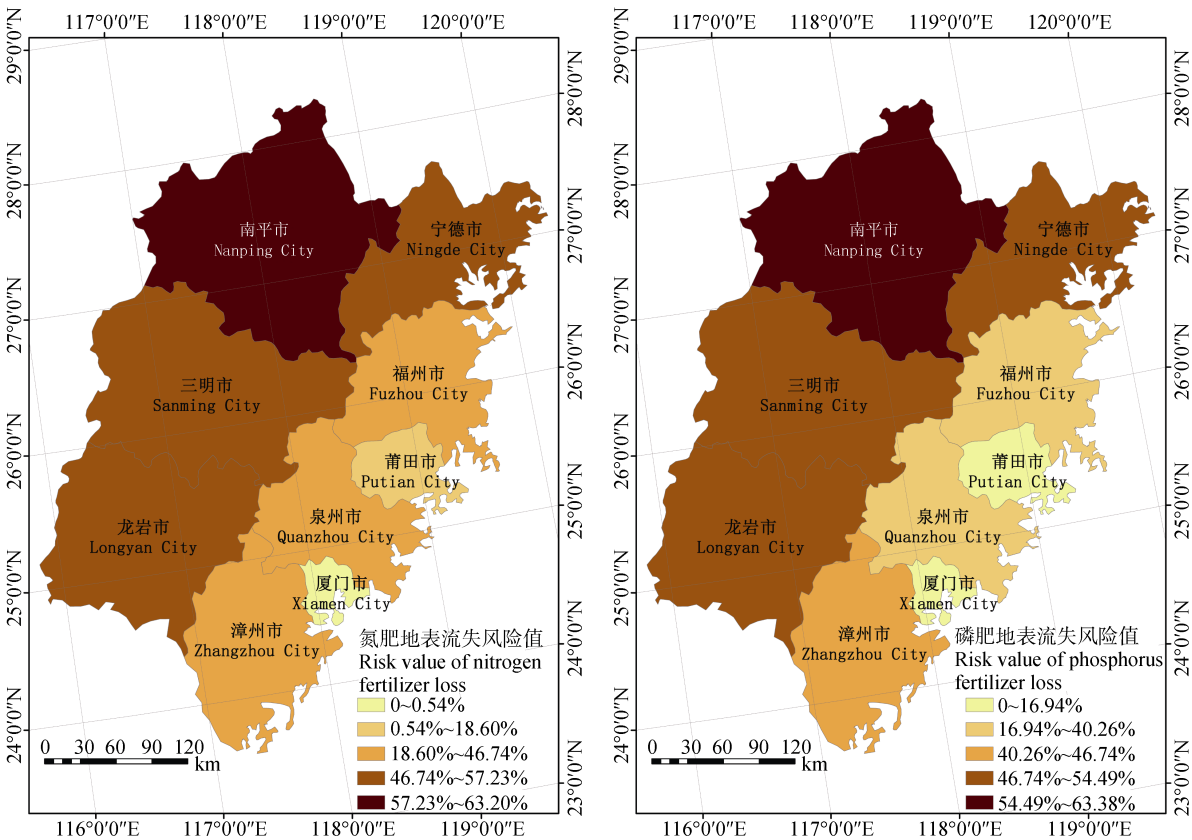

图 6　2015 年福建省农田氮磷地表径流流失污染风险值

Fig. 6　Risk values of surface runoff losses of nitrogen and phosphorus fertilizers in Fujian Province in 2015

其次是宁德市、三明市、龙岩市、漳州市和泉州市，分别为 57.22%、53.34%、51.38%、46.73%和 45.49%，均属于中度风险水平；福州市氮肥流失风险值为 34.35%，属于较低风险水平；然而莆田市和厦门市氮肥流失污染风险值分别为 18.59%和 0.53%，属于低风险水平。同时，南平市的磷肥流失污染风险值也最大，达 63.37%，属于较高风险水平；其次是宁德市、三明市、龙岩市、漳州市和泉州市，分别为 54.48%、53.92%、51.20%、46.73%和 40.25%，均属于中度风险水平；福州市磷肥流失风险值为 33.80%，属于较低风险水平，然而莆田市和厦门市氮肥流失污染风险值分别为 16.93%和 0.53%，属于低风险水平。值得注意的是，原本较高氮磷地表流失强度区域，例如南平市，其氮肥流失强度为 5.41 kg·hm^{-2}(图 5)，但其氮肥污染风险却达最高水平(图 6)，这很有可能与南平市境内河网密度较大有关。

进一步将氮、磷地表流失污染风险指标进行聚类分析(图 7)，在欧式距离为 5.0 时，福建省 9 个地级市可划分为 3 大区域(表 3)，可见这些地区的氮磷地表流失风险等级差异明显。

中度偏高污染风险区：该区域包含三明市、龙岩市、宁德市和南平市 4 个地级市，其中氮、磷地表流失风险值均达 0.56 左右，属中度偏高风险水平。中度偏低污染风险区：该区域包含泉州市、漳州市和福州市 3 个地级市，其中氮、磷地表流失风险值分别为 0.42 和 0.40 左右，属中度偏低风险水平。低度污染风险区：该区域包含厦门市和莆田市 2 个地级市，其中氮、磷地表流失风险值分别为 0.10 和 0.09 左右，属低度风险水平。

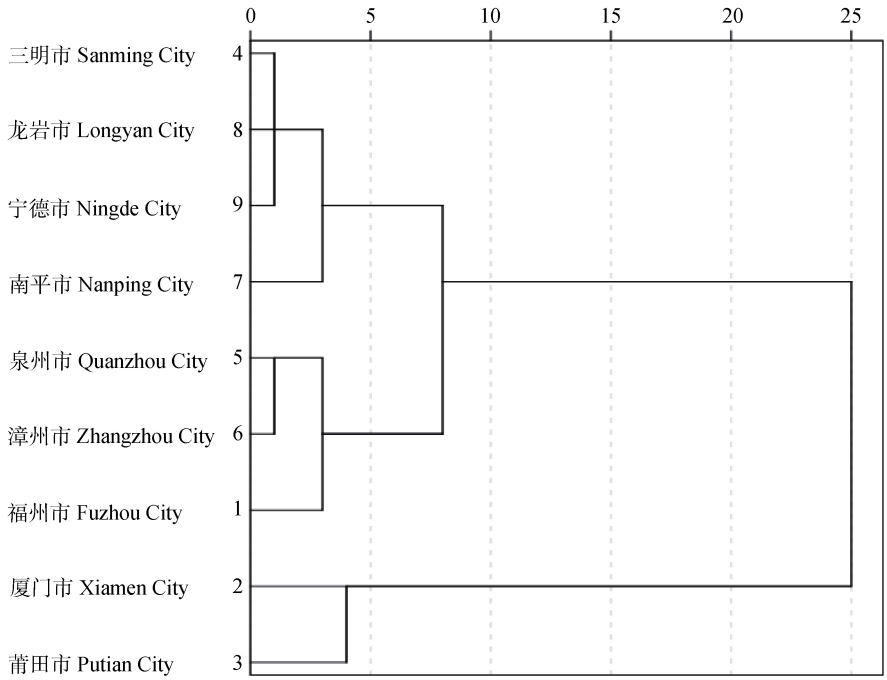

图 7 福建省氮磷地表流失风险等级聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of risk level of surface runoff loss of nitrogen and phosphorus fertilizers in cities of Fujian Province in 2015

表 3 福建省三大区域的氮磷地表流失风险值

Table 3 Risk values of nitrogen/phosphorus surface runoff losses in three areas of Fujian Province in 2015

	中度偏高区 Moderate to high risk area	中度偏低区 Moderate to low risk area	低风险区 Low risk area
氮地表径流流失 Nitrogen surface runoff loss	0.56±0.05	0.42±0.07	0.10±0.13
磷地表径流流失 Phosphorus surface runoff loss	0.56±0.05	0.40±0.06	0.09±0.12

3 讨论与结论

目前，农业面源污染是导致地表水富营养化、地下水硝酸盐及其污染物超标的主要原因，对区域性水资源安全构成严重威胁[17-18]。其中，由于长期过量施肥或施肥不当所引发的水体氮磷营养元素富集问题最为突出[19]。王丹等[20]研究发现，过量施用化学氮肥是太湖流域辛庄镇环境氮负荷的主要原因；程磊磊等[21]和耿飙等[22]对洱海流域水质富营养化的调查分析发现，过度施用化肥和少施有机肥是其主要污染来源；林施泉等[23]研究发现，福建省木兰溪流域下游木兰坡段水体处于富营养化，受人为影响较大。可见，过度施肥(化学肥料)是引起氮磷元素流失富集污染的重要因素之一。本研究发现，近 30 年

来, 福建省化肥施用量呈先下降后上升的趋势。其中, 1999—2001 年, 全省化肥施用总量由 1.243×10^4 t 减少到 1.174×10^4 t, 随后, 全省化肥施用总量有所增加, 在 2014 年施肥总量达 1.226×10^4 t, 与同期全省蔬菜产业快速发展的趋势一致, 推测是蔬菜产业拉动了农地化肥施用量的上升。反过来, 化肥集约施用也一定程度促进了蔬菜产量和产值的提高。然而, 2015—2016 年福建省化肥施用总量虽有略增, 但增幅较小, 2016 年全年化肥施用量比 2015 年增幅仅为 0.04%, 这与 2015 年全国开始实施《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》等实施农业领域的生态文明建设大政方针有直接关系。由此, 可以预见, 随着福建省强化实施“化肥零增长”行动, 其化肥施用量有望明显降低。

除了化肥施用总量外, 化肥施用强度是直观体现一个地区化肥施用状况的重要指标, 也值得关注[3]。本研究发现, 福建省东南沿海地区的氮磷肥施用强度大于西北山区, 尤其是地处福建省农业重镇的闽南地区漳州市的氮磷肥施用强度最大, 分别为 880.40 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 429.21 $kg\cdot hm^{-2}$, 这与徐福祥[24]、张瑜[25]的研究结果一致。同时, 一个地区氮磷肥的流失量与该地区氮磷肥施用总量、流失系数有着直接关系[3]。本研究发现, 福建省东南沿海地区的氮磷肥流失量大于西北山区, 其中漳州市的氮磷肥流失量最大, 分别达 1.571×10^6 kg 和 3.590×10^5 kg。经过笔者调查发现, 漳州市是福建省农业生产大市, 在 2016 年全市农作物播种面积达 2.65×10^6 hm^2, 化肥施用量高达 4.03×10^8 kg, 农业总产值达 388.39 亿元[26-27], 可见该地区农业生产强度大, 农业化肥施用量大, 以致氮磷肥施用强度和流失数量偏高。因此, 如何引导当地农民科学合理地施用化肥和提高化肥利用率是接下来研究的重点和难点。

降雨量、流失量和河网密度是引起氮磷地表径流流失的主要因素[3]。宋太平等[28]对淮河流域农业面源污染负荷时空分布特征进行研究, 发现淮河流域西北部地区负荷强度高于东南部, 并揭示化肥的施用是其氮素污染的主要来源。本研究发现, 地处闽北山区的南平市是高氮磷肥污染风险区域, 地处闽南平原的厦门市为低氮磷肥污染风险区域, 其他市处于两者之间。

本研究结果表明, 漳州地区在促进农业可持续发展过程中要注重化肥的减量化, 南平市则重点防范农田氮磷地表径流流失的风险防范。本研究进一步利用聚类分析, 将福建省 9 个地级市根据氮磷污染程度划分为 3 大区域, 分别为中度偏高污染风险区、中度偏低污染风险区和低度污染风险区。其中, 中度偏高污染风险区大部分地区以农业生产为主, 并且降雨量大、河网密集, 稍不注意容易引起地表径流流失; 而低度污染风险区包含厦门市和莆田市, 农业生产活动较少, 河网较稀疏, 这些区域相对不容易引起地表径流流失。 为了使得风险评估结果更接近于实际风险值, 在将来的研究中需要进一步研究各个地区内在的实际情况和评价体系, 尤其是对不同影响因素间的差异性赋值, 从而获得更加贴近实际情况的风险区域划分。总之, 本研究结果将有助于实现对福建省农田面源污染的风险防范, 可为福建省生态文明先行示范区、生态文明试验区的建设提供理论依据与数据支撑。

参考文献 References

[1] 王建兵, 程磊. 农业面源污染现状分析[J]. 江西农业大学学报: 社会科学版, 2008, 7(3): 35–39
WANG J B, CHENG L. Analysis on the present situation of agricultural non-point source solution[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University: Social Sciences Edition, 2008, 7(3): 35–39

[2] 王国重, 李中原, 左其亭, 等. 丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3): 415–422
WANG G Z, LI Z Y, ZUO Q T, et al. Estimation of agricultural non-point source pollutant loss in catchment areas of Danjiangkou Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(3): 415–422

[3] 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 C, ZHOU H Z, CHEN L, 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

[4] 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 Q P. 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

[5] 吴义根, 冯开文, 李谷成. 我国农业面源污染的时空分异与动态演进[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(7): 186–199
WU Y G, FENG K W, LI G C. Spatial-temporal pattern and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 186–199

[6] 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): 2189–2201

[7] 李佳韵, 童菊秀, 夏传安, 等. 降雨条件下农田氮素地表径流流失特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 8–15
LI J Y, TONG J X, XIA C A, et al. Experiments study on farmland nitrogen loss to surface runoff under rainfall condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 8–15

[8] 周晓琴, 杨乐, 杨令飞. 新疆农业面源污染物排放量估算及分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1300–1307
ZHOU X Q, YANG L, YANG L F. Estimation and analysis of emissions from agricultural non-point source pollution in Xinjiang[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1300–1307

[9] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2278–2286
LU S Y, ZHANG P, PAN C R, et al. Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake[J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2278–2286

[10] 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 X L, TONG Y A, LU Y L, 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

[11] 吕玉娟, 彭新华, 高磊, 等. 红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(2): 297–304
LYU Y J, PENG X H, GAO L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses through surface runoff on sloping land, red soil hilly region[J]. Soils, 2015, 47(2): 297–304

[12] 陈颖, 赵磊, 杨勇, 等. 海河流域水稻田氮磷地表径流流失特征初探[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 328–333
CHEN Y, ZHAO L, YANG Y, et al. Preliminary study on characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses from rice fields in Hai River Basin, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(2): 328–333

[13] 向速林, 王逢武, 陶术平, 等. 赣江下游水稻田地表径流氮磷流失分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 315–317
XIANG S L, WANG F W, TAO S P, et al. Study on characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses from rice fields in the Ganjiang River downstream[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(1): 315–317

[14] 陈翠蓉, 刘伟平. 福建省农业面源污染现状和治理对策研究[J]. 山西农业大学学报: 社会科学版, 2016, 15(5): 353–357
CHEN C R, LIU W P. On agricultural non-point source pollution in Fujian Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Social Science Edition, 2016, 15(5): 353–357

[15] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 等. 全国农田面源污染排放系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015
REN T Z, LIU H B, FAN X P, et al. Handbook of Farmland Non-Point Source Pollution Emission Coefficient in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015

[16] 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院资源环境科学数据中心. 资源环境数据云平台[DB/OL]. http:www.resdc.cn
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences; Data Center for Resource and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences. Resource and Environment Data Cloud Platform[DB/OL]. http:www.resdc.cn

[17] ZHANG B L, CUI B H, ZHANG S M, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution in Nansi Lake Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 19101–19113

[18] LU H, XIE H L. Impact of changes in labor resources and transfers of land use rights on agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 134–140

[19] 刘钦普. 国内农田氮磷面源污染风险控制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 1–5
LIU Q P. Research progress of environmental risk control of N and P non-point source pollution in domestic farmland[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(1): 1–5

[20] 王丹, 王延华, 杨浩, 等. 太湖流域农田生产—畜禽养殖系统氮素流动特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 457–464
WANG D, WANG Y H, YANG H, et al. Nitrogen flow features of crop-livestock breeding system in Taihu Lake Basin[J]. Research of Environmental Science, 2016, 29(3): 457–464

[21] 程磊磊, 尹昌斌, 胡万里, 等. 云南省洱海北部地区农田面源污染现状及控制的补偿政策[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 471–474
CHENG L L, YIN C B, HU W L, et al. Subsidy policy for agricultural nonpoint pollution control in northern area of Erhai Lake of Yunnan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010, 31(4): 471–474

[22] 耿飙, 罗良国. 农户减少化肥用量和采用有机肥的意愿研究——基于洱海流域上游面源污染防控的视角[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 74–82
GENG B, LUO L G. farmers' willingness to reduce fertilizer input and adopt organic fertilizer — Based on the perspective of non-point source pollution prevention and control in the upper reaches of Erhai watershed[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 74–82

[23] 林施泉, 邵晓阳, 姜丹, 等. 福建省木兰溪流域浮游植物群落结构特征[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 48–53
LIN S Q, SHAO X Y, JIANG D, et al. Community structure characteristics of phytoplankton in Drainage area of Mulan River, Fujian Province[J]. Wetland Science, 2013, 11(1): 48–53

[24] 徐福祥. 基于 GIS 技术的福建省耕地土壤酸化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015

XU F X. Study on the acidification of cropland soil in Fujian by GIS technology[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015

[25] 张瑜. 基于平衡施肥的福建省耕地化肥资源优化配置研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015
ZHANG Y. Study on the fertilizer resources optimal allocation of Fujian Province cultivated land based on the balanced fertilization[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015

[26] 杨洪春. 福建统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
YANG H C. Statistical Yearbook of Fujian Province[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017

[27] 漳州市统计局. 漳州市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
Zhangzhou Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Zhangzhou City[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017

[28] 宋太平, 左强, 刘本生, 等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究——以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1219–1231
SONG T P, ZUO Q, LIU B S, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: A case study of the Huaihe River Basin, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1219–1231