

赵祖军, 郑田甜, 赵筱青, 等. 云南高原湖泊流域种植业面源污染物的流失特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 40-47.

ZHAO Zu-jun, ZHENG Tian-tian, ZHAO Xiao-qing, et al. Non-point Source Pollutants Loss of Planting Industry in the Yunnan Plateau Lake Basin, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(1): 40-47.

# 云南高原湖泊流域种植业面源污染物的流失特征分析

赵祖军<sup>1</sup>, 郑田甜<sup>2</sup>, 赵筱青<sup>2,3\*</sup>, 普军伟<sup>2</sup>, 卢飞飞<sup>2</sup>

(1. 云南省环境中心监测站, 云南 昆明 650034; 2. 云南大学资源环境与地球科学学院, 云南 昆明 650500; 3. 云南大学“一带一路”战略研究院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 种植业面源污染已经成为我国水环境质量的重大影响因素, 近些年的研究表明, 农药化肥中的氮、磷元素的流失使种植业面源污染更加严重。本文通过流失系数法和空间叠加分析, 对 2015 年云南三大高原湖泊(抚仙湖、星云湖和杞麓湖)流域种植业总氮、总磷、铵态氮、硝态氮的流失量和流失强度及其空间分布特征进行分析研究。结果表明: 三大流域内种植业总氮流失量最大, 其次为铵态氮、硝态氮、总磷, 流失强度分别为 2.73~22.07、0.003~3.52、0.01~2.25、0.05~1.36 kg·hm<sup>-2</sup>; 总氮、总磷流失范围主要集中在杞麓湖的西南部, 星云湖西部和南部。铵态氮、硝态氮流失主要集中在杞麓湖的南部, 星云湖南部和北部; 氮磷元素的流失主要来源于经济作物和水稻。本研究根据研究结果分别制定分区、分级、分阶段防治计划, 以期为控制研究区种植业面源污染提供科学依据。

**关键词:** 三大流域; 种植业; 流失量; 流失强度; 空间分布

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2018)01-0040-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0169

## Non-point Source Pollutants Loss of Planting Industry in the Yunnan Plateau Lake Basin, China

ZHAO Zu-jun<sup>1</sup>, ZHENG Tian-tian<sup>2</sup>, ZHAO Xiao-qing<sup>2,3\*</sup>, PU Jun-wei<sup>2</sup>, LU Fei-fei<sup>2</sup>

(1. Yunnan Environmental Monitoring Center Station, Kunming 650034, China; 2. College of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China; 3. Yunnan University “Belt and Road” Initiative Strategic Research Institute, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Non-point source pollution of planting has become a major factor affecting the quality and safety of water environment in our country. In recent years, some studies show that the loss of nitrogen and phosphorus in agricultural chemical fertilizers has led to more serious non-point source pollution. By means of the loss coefficient method and spatial overlay analysis, the loss amount, loss of strength and its spatial distribution characteristics of total nitrogen, total phosphorus, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen were analyzed in the Fuxian Lake, Xingyun Lake and Qilu Lake Basin in 2015. The results showed that: The loss of total nitrogen was the highest in the three basins, following by ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and total phosphorus, which the loss of intensity range were 2.73~22.07, 0.003~3.52, 0.01~2.25 kg·hm<sup>-2</sup> and 0.05~1.36 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. Total nitrogen and total phosphorus loss were mainly concentrated in the southwest of Qilu Lake, west and south of Xingyun Lake. Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen loss mainly concentrated in the south of Qilu Lake, south and north of Xingyun Lake. The loss of nitrogen and phosphorus was mainly derived from cash crops and rice. Therefore, zoning, grading and phased prevention and control schemes were proposed, in order to provide scientific basis for controlling non-point source pollution in the study area.

**Keywords:** three basins; planting industry; loss amount; loss intensity; spatial distribution

农业面源污染中种植业的贡献最为显著, 其贡献的总氮与总磷已经分别高达污染物排放总量的 1/3

和 1/4, 种植业面源污染已经成为我国水环境质量的重大影响因素<sup>[1]</sup>。研究表明, 种植业中农药和化肥

收稿日期: 2017-06-21 录用日期: 2017-09-25

基金项目: 玉溪地区三大湖泊(抚仙湖、星云湖、杞麓湖)遥感监测项目(玮元-A2016191); “第二批云岭学者培养”项目(C6153001); 云南大学第八届研究生科研创新项目(ynuy2016113)

作者简介: 赵祖军(1976—), 男, 云南镇雄人, 高级工程师, 主要研究方向为水质监测、生态和遥感监测及评价。E-mail: 615587578@qq.com

\* 通信作者: 赵筱青 E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

的施用是水体污染和富营养化最主要的污染源<sup>[2]</sup>,农药和化肥中未被作物吸收的氮、磷等化学元素通过地表径流和地下淋溶两种方式进入附近河流,最后汇入湖泊,对湖泊水质带来严重危害。种植业面源污染具有随机性强、分布范围广、发生滞后、监测及管理控制难度大等特点<sup>[3-7]</sup>,所以分析种植业面源污染物的流失特征十分必要。

云南省高原湖泊是我国湖泊分布最密集的五大湖群之一,高原湖泊及其所在区域是云南省开发较早、利用强度较大、人口特别密集的重要功能区,在防洪、灌溉、工业用水、水产养殖、生活用水、旅游和发电等生产生活方面发挥着重要作用。抚仙湖、星云湖、杞麓湖三大湖泊对玉溪市的气温降水和社会经济发展起着重要作用,但受到流域内种植业面源污染的影响,水质每况愈下。三大流域内人口密集、农田众多且大部分位于湖泊周边。流域内主要种植水稻、旱作作物、经济作物(蔬菜、油菜和烤烟)和果树,水体富营养化的问题愈加严重。关于抚仙湖流域的研究,陈红等<sup>[8]</sup>对农业面源污染的控制进行研究,提出应加强生态农业的建设;李正兆等<sup>[9]</sup>探讨了农田浅层地下水的污染状况及影响因素,得出施肥对地下硝态氮浓度影响显著;夏训峰等<sup>[10]</sup>在考虑水环境容量农业分配量、农业面源污染削减、粮食及副食品安全的基础上,建立了农业产业结构优化调整的系统动力学模型,结果表明目标导向发展方案可以有效降低流域内污染物入湖量;许杰玉等<sup>[11]</sup>对星云湖流域分析了水环境质量现状、入湖河流污染贡献及主要污染成因分析。杨逢贵等<sup>[12]</sup>对杞麓湖南岸区域的农业面源污染物流失进行了现场观测。区域农业面源污染物主要通过灌溉后的农田废水和降雨径流 2 种途径流失。在三湖流域的研究中,农业面源污染物来源的分析中都提出主要来源于农药、化肥中的营养元素,但关于这些污染物的流失强度和空间分布都没有涉及,更没有将三大湖泊综合起来的对比研究,在很大程度上限制了流域内种

植业面源污染治理的相关工作的深入开展。因此,本文计算了三大流域种植业总氮、总磷、铵态氮、硝态氮的流失量和流失强度以及水稻、旱作作物、经济作物和果树的流失强度,最后对研究区内 23 个乡镇的污染强度随空间变化进行分析,并提出了相应的污染治理办法。

1 材料与方法

1.1 数据来源

三大湖泊流域种植业面源污染流失强度和空间分布特征分析所需数据及来源见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 流失系数法

目前,种植业面源污染的流失研究方法有实测法<sup>[13-14]</sup>、模型法<sup>[15-16]</sup>和流失系数法<sup>[17-18]</sup>。相较于实测法和模型法,流失系数法更加的省时省力省财,也能说明研究区的问题。所以种植业化肥中营养物质的流失量计算,根据《第一次全国污染源普查—农业污染源—肥料流失系数手册》(2009 年)南方山地丘陵区相关参数为依据,选取缓(陡)坡地非梯田横坡旱地园地、缓(陡)坡地梯田水田单季稻、缓(陡)坡地非梯(梯)田横坡旱地露地蔬菜、缓(陡)坡地非梯(梯)田横坡旱地大田一熟 8 种模式的流失系数,结合问卷调查数据计算化肥中营养物质的流失量。TN 的计算公式如下:

$$TN = \sum_{i=1}^4 [H_{TN}\alpha_i \times N_H + D_{TN}\beta_i \times N_D] \tag{1}$$

式中: $i$  表示种植方式旱作、经济作物、水稻、果树, $N_H$  表示缓坡地化肥施用量, $N_D$  表示陡坡地化肥施用量,TN 表示总氮的流失量, $H_{TN}\alpha_i$  表示缓坡地第  $i$  种植方式总氮的流失系数, $D_{TN}\beta_i$  表示陡坡地第  $i$  种植方式总氮的流失系数。TP、 $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  的计算方法同 TN 相似,只需将流失系数相应修改即可。8 种植模式的流失系数见表 2。

表 1 数据来源及说明

Table 1 Data source and description

| 数据类型       | 数据内容                                           | 备注                       | 数据来源                                                                              |
|------------|------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 遥感影像       | 下载 2015 年 11 月 20 日 landsat8 和 landsat7 ETM 数据 | 得到 2015 年三大流域的农作物种植面积的变化 | 美国地质勘探局<br>( <a href="http://glovis.usgs.gov/">http://glovis.usgs.gov/</a> )      |
| 统计年鉴       | 抚仙湖、星云湖、杞麓湖流域 2015 年统计数据,包括农作物播种面积等            | 用来检验目视解译中农作物的种植面积        | 澄江县、江川县、通海县统计局                                                                    |
| 问卷调查       | 生产资料、排污设施、污水处理厂                                | 得到研究区肥料的施用量、排污情况、污水处理情况  | 研究区 23 个镇                                                                         |
| 玉溪市 DEM 数据 | 坡度分级                                           | 得到三大流域平地、缓坡、陡坡的面积        | 中国科学院计算机网络信息中心<br>( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> ) |

### 1.2.2 流失强度的计算

#### (1) 遥感影像的处理

对已下载的遥感影像进行几何校正、辐射校正、图像融合、图像裁剪和波段组合的预处理;然后将通过预处理的影像进行判读,建立解译标志;将判读的结果进行实地的采点验证,31 个采样点中,采样点与判图时的土地利用类型对照一致的点有 28 个,解译精度为 90.32%,对判读错误的地类进行检查与修正;最后统计年鉴上 23 个乡镇的种植面积合计为 42 507.32 hm<sup>2</sup>,判读结果为 42 886.94 hm<sup>2</sup>,判读误差为 0.89%,通过检验。

#### (2) 流失强度的计算

一般而言,种植业化肥中营养物质的流失强度不但与流失量有关,还与各乡镇的种植面积有关。污染物的流失强度表示的是单位面积上的污染物流失量, TN 计算公式如下:

$$TN_s = TN / \sum_{i=1}^4 A_i \quad (2)$$

式中: TN<sub>s</sub> 为总氮流失强度, TN 表示总氮的流失量, *i* 表示种植方式旱作、经济作物、水稻、果树,  $\sum_{i=1}^4 A_i$  为该乡镇种植面积。TP<sub>s</sub>、NH<sub>4</sub>-N<sub>s</sub> 和 NO<sub>3</sub>-N<sub>s</sub> 的计算方法同 TN<sub>s</sub> 相似,只需将流失量相应修改即可。

### 1.2.3 空间叠加分析

在统一空间参照系统条件下,将同一地区两个地理对象的图层进行叠置,建立地理对象之间的空间对应关系,将种植业面源污染物的流失强度和矢量化后的抚仙湖、星云湖、杞麓湖三大流域的乡镇行政区划图进行 union 联合,按照已经确定的乡镇面积的地理指标,对叠加后产生的具有不同级别的流失强度进行分级。本文依据罗遵兰等<sup>[19]</sup>、王丽华<sup>[20]</sup>、赵林萍<sup>[21]</sup>等对各污染物流失水平的划分,再结合研究区的情况,分别将总氮、总磷、铵态氮和硝态氮划分出强流失水平、

较强流失水平、中等流失水平、较低流失水平和低流失水平。最后得到各乡镇流失强度空间分布的特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 污染物流失量

三大流域内各污染物中总氮流失量最大,贡献率达 85%以上(图 1)。流失量最大的是江城镇,每年流失的污染物高达 118 712.13 kg;流失量最小的是宁州街,每年流失的污染物达 539.07 kg。研究区内包括 23 个镇,其中污染量高于 60 000 kg 的有 8 个镇。这 8 个镇中,抚仙湖流域内有 1 个为九街镇;星云湖流域有 3 个,分别是大街镇、江城镇和前卫镇;杞麓湖流域有 2 个,分别是河西镇和杨广镇,由此可知污染物流失量最大的流域是星云湖流域。

### 2.2 污染物流失强度及等级划分

计算流域内各乡镇不同污染物单位耕地上流失强度,得出流域内各乡镇总氮、总磷、铵态氮、硝态氮流失强度范围分别为:2.73~22.07、0.05~1.36、0.003~3.52、0.01~2.25 kg·hm<sup>-2</sup>,流失强度等级区间见表 3,不同流失强度等级对应的耕地面积及分布乡镇见表 4。

各乡镇总氮流失强度差异较大,最低的乡镇总氮流失水平为 2.73 kg·hm<sup>-2</sup>,最高的总氮流失水平为 22.07 kg·hm<sup>-2</sup>。其中强流失水平占 17.39%、较强流失水平占 34.78%、中等流失水平占 26.09%、较低流失水平占 13.04%、低流失水平占 8.7%。综上,在研究区内总氮的流失强度主要集中在较强流失水平和中等流失水平(13.85~19.28 kg·hm<sup>-2</sup>)。

总磷流失强度差异大,乡镇最低的总磷流失水平为 0.05 kg·hm<sup>-2</sup>,最高的总磷流失水平为 1.36 kg·hm<sup>-2</sup>。其中强流失水平占 17.39%、较强流失水平占 13.04%、中等流失水平占 30.43%、较低流失水平占 17.39%、低流失水平占 21.74%。综上,在研究区内总磷的流失强度主要集中在中等流失水平和低等流失

表 2 不同种植模式 TN、TP、NH<sub>4</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-N 的流失系数(%)

Table 2 Loss coefficient of different planting patterns(%)

| 序号 | 监测类型 | 地形  | 土地利用方式 | 种植模式 | 总氮    | 总磷    | 铵态氮   | 硝态氮   |
|----|------|-----|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 地表径流 | 缓坡地 | 旱地     | 园地   | 0.536 | 0.120 | 0.097 | 0.071 |
| 2  |      |     |        | 大田一熟 | 0.502 | 0.111 | 0.094 | 0.346 |
| 3  |      |     |        | 露地蔬菜 | 1.640 | 0.935 | —     | 0.097 |
| 4  |      |     | 水田     | 单季稻  | 1.125 | 0.641 | 0.285 | 0.349 |
| 5  |      | 陡坡地 | 旱地     | 园地   | 0.676 | 0.289 | 0.019 | 0.339 |
| 6  |      |     |        | 大田一熟 | 0.340 | 0.100 | 0.012 | 0.018 |
| 7  |      |     |        | 露地蔬菜 | 1.500 | 0.850 | —     | 0.089 |
| 8  |      |     | 水田     | 单季稻  | 1.013 | 0.577 | —     | 0.300 |

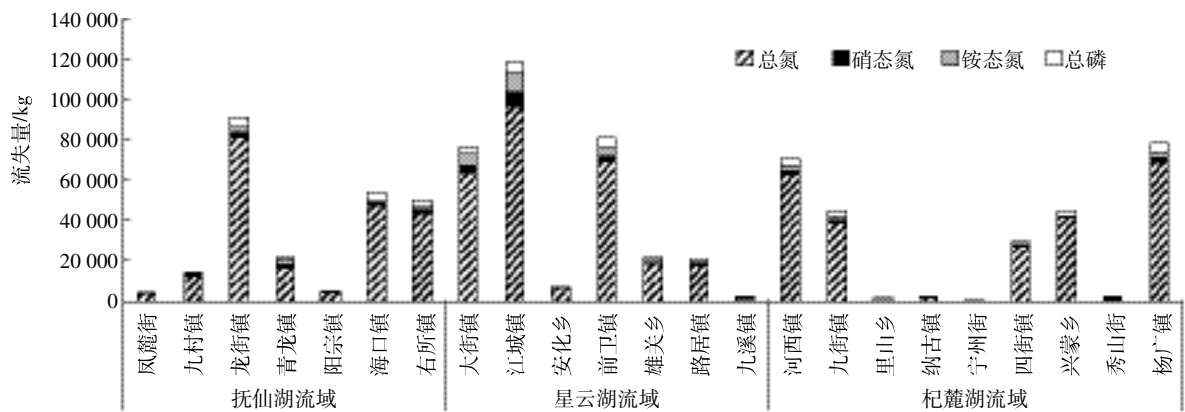


图 1 2015 年三大流域污染物流失量

Figure 1 Pollutants loss amount of three basins in 2015

表 3 2015 年三大流域污染物流失强度等级划分(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 3 Pollutants loss intensity classification of three basins in 2015(kg·hm<sup>-2</sup>)

| 污染物 | 低流失水平     | 较低流失水平     | 中等流失水平      | 较强流失水平      | 强流失水平       |
|-----|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 总氮  | 2.73~8.83 | 8.84~13.84 | 13.85~16.14 | 16.15~19.28 | 19.29~22.07 |
| 总磷  | 0.05~0.63 | 0.64~0.89  | 0.9~1.02    | 1.03~1.14   | 1.15~1.36   |
| 铵态氮 | 0.003~0.1 | 0.11~0.5   | 0.51~1.5    | 1.51~2.5    | 2.51~3.52   |
| 硝态氮 | 0.01~0.15 | 0.16~0.55  | 0.56~0.95   | 0.96~1.35   | 1.36~2.25   |

表 4 2015 年三大流域不同流失强度等级对应的种植面积及分布乡镇

Table 4 The planting area and distribution towns of the different loss intensity levels of the three basins

| 流失强度等级 | 种植面积/hm <sup>2</sup> |           |           |           | 分布乡镇/个 |    |     |     |
|--------|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------|----|-----|-----|
|        | 总氮                   | 总磷        | 铵态氮       | 硝态氮       | 总氮     | 总磷 | 铵态氮 | 硝态氮 |
| 低流失水平  | 1 988.58             | 1 449.31  | 707.39    | 897.08    | 2      | 5  | 3   | 3   |
| 较低流失水平 | 4 473.25             | 11 852.19 | 5 106.67  | 17 546.53 | 3      | 4  | 7   | 8   |
| 中等流失水平 | 14 282.89            | 15 252.64 | 22 288.95 | 7 272.41  | 6      | 7  | 10  | 7   |
| 较强流失水平 | 19 863.47            | 8 572.57  | 14 767.59 | 17 103.13 | 8      | 3  | 2   | 4   |
| 强流失水平  | 2 278.77             | 5 760.24  | 16.34     | 67.79     | 4      | 4  | 1   | 1   |
| 合计     | 42 886.94            | 42 886.94 | 42 886.94 | 42 886.94 | 23     | 23 | 23  | 23  |

水平。

铵态氮流失强度差异明显,乡镇最低的铵态氮流失水平为 0.003 kg·hm<sup>-2</sup>,最高的铵态氮流失水平为 3.52 kg·hm<sup>-2</sup>。其中强流失水平占 4.35%、较强流失水平占 8.70%、中等流失水平占 43.48%、较低流失水平占 30.43%、低流失水平占 13.04%。综上,在研究区内铵态氮的流失强度主要集中在中等流失水平和较低流失水平(0.12~1.5 kg·hm<sup>-2</sup>)。

硝态氮流失强度差异大,乡镇最低的硝态氮流失水平为 0.01 kg·hm<sup>-2</sup>,最高的硝态氮流失水平为 2.25 kg·hm<sup>-2</sup>。其中强流失水平占 4.35%、较强流失水平占 17.39%、中等流失水平占 30.43%、较低流失水平占 34.78%、低流失水平占 13.04%。综上,在研究区内硝

态氮的流失强度主要集中在中等流失水平和较低流失水平(0.16~0.95 kg·hm<sup>-2</sup>)。

### 2.3 污染物流失强度的空间分布

总氮的强流失水平乡镇主要分布在星云湖的西北部和杞麓湖的西南部;较强流失水平乡镇主要分布在星云湖流域;中等流失水平乡镇主要分布在抚仙湖的西部和北部及杞麓湖流域;较低流失水平和低流失水平乡镇主要分布在抚仙湖的东部和北部(图 2)。

总磷的强流失水平乡镇主要分布在杞麓湖的西南部;较强流失水平乡镇主要分布在星云湖西部和南部;中等流失水平乡镇主要分布在星云湖的北部和东部、抚仙湖的西北部;较低流失水平和低流失水平乡镇主要分布在抚仙湖的东北部和东部、杞麓湖的西部

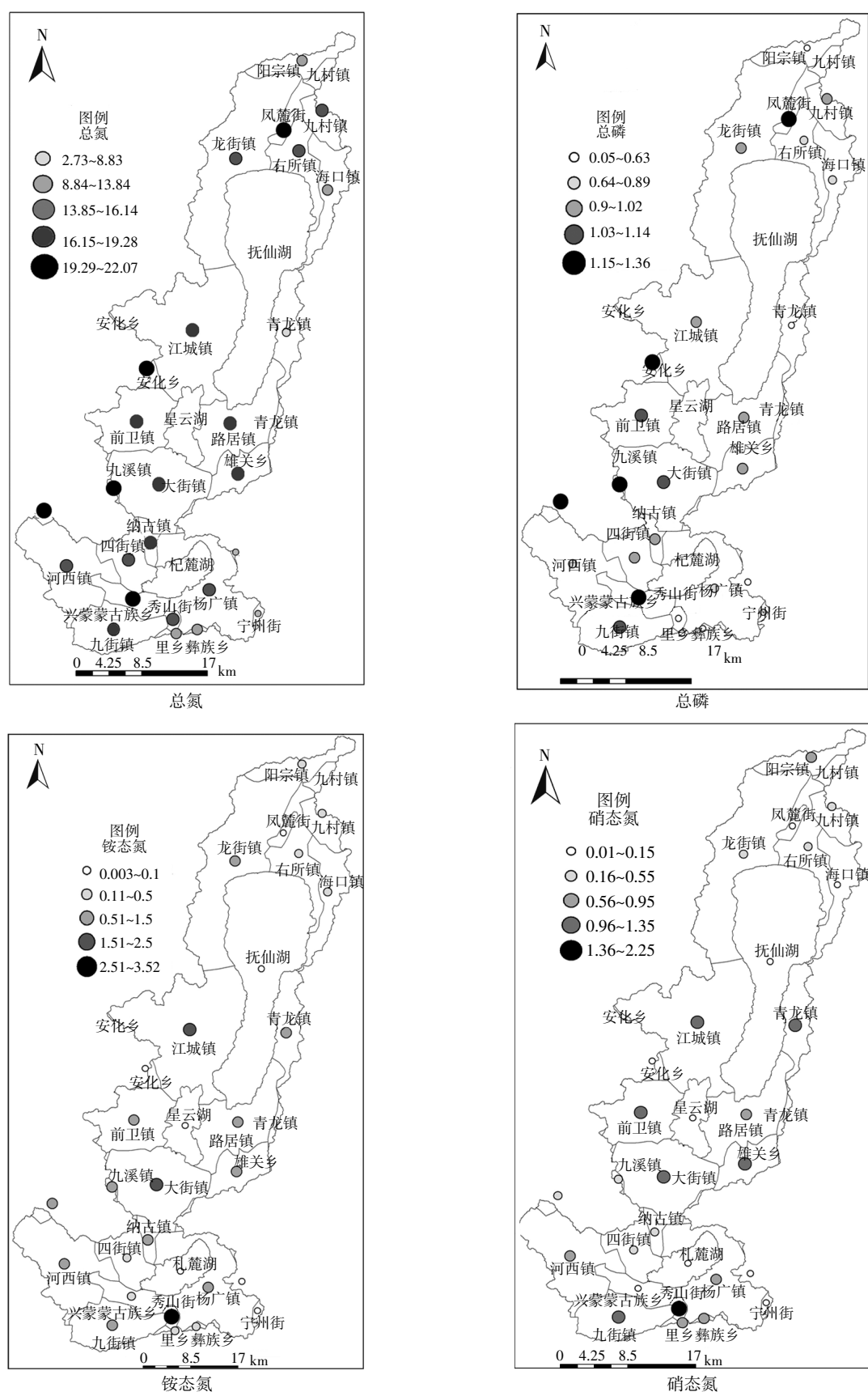


图 2 2015 年总氮、总磷、铵态氮、硝态氮流失强度空间分布图

Figure 2 Loss intensity spatial distribution of total nitrogen, total phosphorus, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen in 2015

和东部(图 2)。

铵态氮流失强度空间分布特征和硝态氮的类似,强流失水平乡镇主要分布在杞麓湖的南部;较强流失水平乡镇主要分布在星云湖南部和北部;中等流失水平乡镇主要分布在星云湖的西部和东部、抚仙湖的西北部和东南部、杞麓湖流域;较低流失水平和低流失水平乡镇主要分布在抚仙湖的东北部和杞麓湖的西部(图 2)。

硝态氮的强流失水平乡镇主要分布在杞麓湖的南部;较强流失水平乡镇主要分布在星云湖南部和北部、抚仙湖的东部;中等流失水平乡镇主要分布在星云湖的西部和东部,杞麓湖流域;较低流失水平和低流失水平乡镇主要分布在抚仙湖的北部和杞麓湖的西北部(图 2)。

## 2.4 污染物流失强度与作物类型的关联度

三大流域中农作物的污染物流失强度为:经济作物  $32.37\sim35.24\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、水稻  $20.35\sim23.36\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、旱作作物  $9.57\sim11.34\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、果树  $3.21\sim4.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。三大流域的总面积为  $141\,422.57\text{ hm}^2$ ,其中农作物的种植面积为  $47\,886.94\text{ hm}^2$ ,占 30.33%。可见,三大流域内农业是主要生产方式。经济作物和水稻的污染物流失强度大,一方面由于经济作物和水稻分布在湖泊周围(图 3),湖泊周边皆为平地 and 缓坡,流失系数大,其中露地蔬菜的总氮流失系数为  $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,总磷流失系数为  $1.38\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,水稻的总氮流失系数为  $19.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,总磷流失系数为  $0.45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,均大于大田和果树的流失系数;另一方面,农户的种植意愿越来越倾向于经济作物,而经济作物和水稻农药化肥的施用量高,其中全年经济作物的农药使用量是  $40.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,化肥施用量是  $5\,250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,粮食作物的农药使用量是  $10.20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,化肥施用量是  $1\,650\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,并且经济作物的复种指数高,经济作物播种面积越大,使用的农药、化肥量越多,而农药中的氮磷元素和化肥中氮肥、磷肥中流失的总氮、总磷、铵态氮和硝态氮通过降雨地表径流和地下淋溶的方式进入湖泊,对湖泊水质带来影响。经济作物和水稻主要分布在星云湖整个流域、杞麓湖西南部和抚仙湖的北岸,和总氮、总磷强流失水平、较强流失水平的空间分布一致,所以三大流域内氮磷元素的流失主要来源于经济作物和水稻。

## 2.5 防治计划

玉溪市三大流域辖 23 个镇,种植业面源污染防治应坚持“分区、分级、分阶段”防治原则,根据铵态

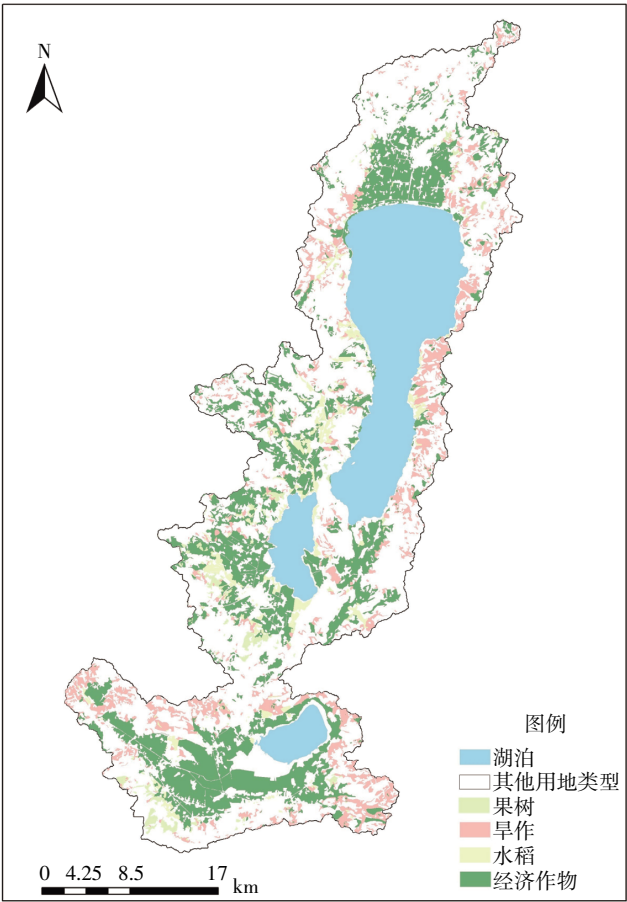


图 3 2015 年三大流域种植类型空间分布图

Figure 3 Damage intensity of crop pollution of three basins in 2015

氮、硝态氮、总氮、总磷的流失强度,以镇为控制单元,确定其分区分级分阶段防治方案为:强流失水平镇为近期一级重点防治,较强流失水平镇为近期二级防治及中远期一级重点防治,中等流失水平镇为中远期二级防治(表 5)。防治措施可采取改善施肥方式、调整化肥品种结构、鼓励施用有机肥、开发和推广土壤固氮、固磷技术等<sup>[21]</sup>。

## 3 讨论

在选取指标上,本文选取总氮、总磷、硝态氮和铵态氮 4 个指标,分别从数量上和空间上说明种植业化肥的营养物质的流失特征。大多数研究<sup>[17-20]</sup>笼统地从氮肥、磷肥或氮磷元素的角度分析,而种植业中农作物施用化肥的营养物质,是以总氮、总磷、硝态氮和铵态氮的形式流入湖泊,所以这 4 个指标的流失特征可以明确显示流域内种植业面源污染对湖泊的影响。罗遵兰等<sup>[19]</sup>只是针对各类污染物的流失特征研究,没有进一步分析造成污染物空间分布的原因,而本文除了

表 5 三大流域种植业面源污染分区、分级、分阶段防治计划

Table 5 The prevention and control plan of crop farming pollution in three basin divided into region, grades and stages

| 污染物 | 近期一级重点防治镇         | 近期二级重点防治镇(中远期一级重点防治镇)           | 中远期二级防治镇                                |
|-----|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 总氮  | 九溪镇、安化乡、凤麓街、兴蒙蒙古乡 | 前卫镇、江城镇、大街镇、雄关乡、九街镇、路居镇、龙街镇、纳古镇 | 四街镇、九村镇、河西镇、杨广镇、右所镇、秀山街                 |
| 硝态氮 | 秀山街               | 江城镇、大街镇、青龙镇、雄关乡                 | 前卫镇、九街镇、路居镇、河西镇、杨广镇、里山彝族乡、阳宗镇           |
| 铵态氮 | 秀山街               | 江城镇、大街镇                         | 青龙镇、雄关乡、前卫镇、路居镇、九街镇、龙街镇、纳古镇、河西镇、杨广镇、九溪镇 |
| 总磷  | 凤麓街、兴蒙蒙古乡、安化乡、九溪镇 | 前卫镇、九溪镇、九街镇                     | 大街镇、江城镇、雄关乡、龙街镇、纳古镇、路居镇、四街镇             |

分析了云南三大高原湖泊(抚仙湖、星云湖、杞麓湖)流域种植业面源污染物的流失特征,还初步分析了这些污染物与种植类型之间的关系,得出经济作物和水稻主要分布地区与总氮、总磷主要流失水平的空间分布特征一致,所以氮磷元素的流失主要来源于经济作物和水稻;从研究结果上,罗遵兰等<sup>[19]</sup>、李春哲<sup>[24]</sup>、钱晓雍等<sup>[22]</sup>对各自研究区农业面源污染负荷进行计算,得出流失量最大的是总氮,与本文的研究结果一致,这源于流域内种植业氮肥的大量使用;对磷素分析时,朱永澍等<sup>[25]</sup>用监测浓度的方法分析太湖周边的小流域,并未结合周边乡镇进行分析,从而在治理方面不能体现各个乡镇上区别,而本文分析了三大流域周边 23 个乡镇的流失强度,可以做到从乡镇上分别治理。然而本文只研究了 2015 年的种植业污染物流失特征,下一步的工作应分析种植业流失量和流失强度的时间变化特征,对了解 10 年来三大流域的种植业污染物的流失变化特征更有意义。

## 4 结论

(1) 三大流域内种植业污染物的数量流失特征:总氮流失量最大,其次为铵态氮、硝态氮、总磷,流失强度范围分别为 2.73~22.07、0.003~3.52、0.01~2.25、0.05~1.36 kg·hm<sup>-2</sup>;总氮流失水平主要处于较强和中等流失水平,硝态氮和铵态氮流失水平主要处于中等和较低流失水平,总磷流失水平主要处于中等和低等流失水平。

(2) 污染物的空间流失特征:总氮、总磷流失主要集中在杞麓湖的西南部、星云湖西部和南部;铵态氮、硝态氮流失主要集中在杞麓湖的南部、星云湖南部和北部。

(3) 污染物与种植类型的关联:农作物中经济作物的流失强度最大,其次为水稻和旱作,果树的流失强度最小,经济作物和水稻主要分布地区和总氮、总

磷强流失水平的空间分布特征一致,所以氮磷元素的流失主要来源于经济作物和水稻。综上,提出分区、分级、分阶段防治计划。

## 参考文献:

- [1] 胡 钰. 流域种植业氮污染监测及负荷估算[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2012.  
HU Yu. Monitoring and loading estimation on non-point sources nitrogen pollution of crop production[D]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Sciences, 2012. (in Chinese)
- [2] 胡宏祥, 洪天求, 马友华. 农业非点源污染及其防治策略研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 315-317.  
HU Hong-xiang, HONG Tian-qiu, MA You-hua. Agricultural non-point source pollution and its tactics of preventing and curing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(4): 315-317. (in Chinese)
- [3] 张宏艳. 发展有机农业遏制农业面源污染[J]. 安徽行政学院学报, 2003(8): 12-13.  
ZHANG Hong-yan. Developing organic agriculture, reducing various pollution resources in agriculture[J]. Journal of Anhui Administration Institute, 2003(8): 12-13. (in Chinese)
- [4] 董伟新. 滇池流域面源污染防控管理调查与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.  
DONG Wei-xin. Survey and research on prevention and control of non-point source pollution in Dianchi Basin[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 李秋芳, 宋维峰. 农业面源污染及其防治对策研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2012(2): 23-26.  
LI Qiu-fang, SONG Wei-feng. Research progress of agricultural non-point source pollution and its control countermeasures[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2012(2): 23-26. (in Chinese)
- [6] 许书军, 魏世强, 谢德体. 非点源污染影响因素及区域差异[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4): 389-393.  
XU Shu-jun, WEI Shi-qiang, XIE De-ti. Analysis of non-point source pollution influence factors and their discrepancy[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(4): 389-393. (in Chinese)
- [7] 朱 梅, 吴敬学. 海河流域种植业非点源污染特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2010, 27(2): 52-58.  
ZHU Mei, WU Jing-xue. Analysis on non-point source pollution char-

- acteristics of crop farming in Haihe River Basin [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2010, 27(2):52-58. (in Chinese)
- [8] 陈红,王声跃,刘俊.抚仙湖流域农业面源污染控制研究[J].云南环境科学,2002,21(3):27-29.
- CHRN Hong, WANG Sheng-yue, LIU Jun. Research on agricultural area-source pollution control in Fuxian Lake[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2002, 21(3):27-29. (in Chinese)
- [9] 李正兆,高海鹰,张奇,等.抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素[J].农业环境科学学报,2008,27(1):286-290.
- LI Zheng-zhao, GAO Hai-ying, ZHANG Qi, et al. Nitrate pollution of groundwater and the affecting factors in typical farmlands of Fuxianhu Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):286-290. (in Chinese)
- [10] 夏训峰,顾雨,席北斗,等.基于水环境约束的抚仙湖流域农业结构调整研究[J].环境科学研究,2010,23(10):1274-1278.
- XIA Xun-feng, GU Yu, XI Bei-dou, et al. Research on agricultural structure regulation in Fuxian Lake basin based on water environment constraints[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(10):1274-1278. (in Chinese)
- [11] 许杰玉,赵晓飞,吕春英,等.星云湖流域水环境污染特征分析与综合整治研究[C].中国环境科学学会学术年会,2015.
- XU Jie-yu, ZHAO Xiao-fei, LÜ Chun-ying, et al. Analysis of water environment pollution characteristics and comprehensive regulation in Xingyun Lake Basin[C]. Annual Conference of China Society of Environmental Science, 2015. (in Chinese)
- [12] 杨逢贵,赵磊,聂菊芬,等.杞麓湖南岸蔬菜种植区农业面源污染物流失特征[J].环境科学导刊,2013,32(4):30-34.
- YANG Feng-gui, ZHAO Lei, NIE Ju-fen, et al. The characteristics of agricultural non-point source pollutant in Southern Lake Qilu[J]. *Environmental Science Survey*, 2013, 32(4):30-34. (in Chinese)
- [13] 王大春,谢卫平,曹骏.入太湖典型河流中氮、磷污染特性及污染源分析[J].污染防治技术,2015,28(2):10-14.
- WANG Da-chun, XIE Wei-ping, CAO Jun. The analyze of sources and characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical river entering Taihu Lake[J]. *Pollution Control Technology*, 2015, 28(2):10-14. (in Chinese)
- [14] 叶红,潘蔚.辽河口沿岸水质污染的光谱监测研究[J].水土保持研究,2006,13(6):188-191.
- YE Hong, PAN Wei. Research on water pollution inspection along the Liao River outlet by using water spectrum characteristics[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6):188-191. (in Chinese)
- [15] 张思聪,刘铭环.竹竿河流域面源污染模拟计算和分析[J].水力发电学报,2006,25(5):51-57.
- ZHANG Si-cong, LIU Ming-huan. Calculation and analysis of the non-point source pollution of Zhuganhe watershed[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(5):51-57. (in Chinese)
- [16] 李嘉竹,刘贤赵,李宝江,等.基于 Logistic 模型估算水资源污染经济损失研究[J].自然资源学报,2009,24(9):1667-1675.
- LI Jia-zhu, LIU Xian-zhao, LI Bao-jiang, et al. Estimation of economic loss caused by water resource pollution based on the logistic model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9):1667-1675. (in Chinese)
- [17] 张丽媛.洋水库集水区氮磷污染特征及流域面源污染负荷估算研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- ZHANG Li-yuan. Studies on pollution characteristics of nitrogen and phosphorus of Yanghe reservoir watershed and non-point source pollution load estimation in its basin[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [18] 刘静,路凤,杨延钊,等.南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究[J].环境科学,2012,33(9):3070-3075.
- LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, et al. Source apportionment of nitrogen and phosphorus from cropping non-point source pollution in Nansi Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9):3070-3075. (in Chinese)
- [19] 罗遵兰,吕凤春,孙光,等.漳卫南流域种植业非点源污染径流流失评估及防治策略[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):145-150.
- LUO Zun-lan, LV Feng-chun, SUN Guang, et al. Evaluation and prevention strategy of non-point source pollution runoff loss for farming in Zhangweinan River basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(10):145-150. (in Chinese)
- [20] 王丽华.密云县境内密云水库上游地区磷流失危险性评价[D].北京:首都师范大学,2006.
- WANG Li-hua. Risk of phosphorus loss in the watershed of Miyun Reservoir[D]. Beijing: Capital Normal University, 2006. (in Chinese)
- [21] 赵林萍.施用有机肥农田氮磷流失模拟研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- ZHAO Lin-ping. Simulation study on nitrogen and phosphorus losses of farmland with organic manure[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [22] 钱晓雍.上海淀山湖区域农业面源污染特征及其对淀山湖水质的影响研究[D].上海:复旦大学,2011.
- QIAN Xiao-yong. Shanghai Dianshan Lake area agricultural non-point source pollution characteristics and study on its influence on water quality in Dianshan Lake[D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [23] 李翠梅,张绍广,姚文平,等.太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究[J].水土保持研究,2016,23(3):354-359.
- LI Cui-mei, ZHANG Shao-guang, YAO Wen-ping, et al. Study on agricultural nonpoint source pollution load of Taihu Lake basin in Suzhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3):354-359. (in Chinese)
- [24] 李春哲.饮马河流域农业面源污染负荷及污染物时空格局演变特征分析[D].长春:吉林农业大学,2016.
- LI Chun-zhe. Analysis on the pollutant load of the agricultural non-point source at the Yinma River basin and the evolutionary characteristics of the pollutant spatial-temporal pattern[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [25] 朱永澍,向龙,余钟波,等.太湖典型小流域磷素流失特征分析[J].水资源保护,2013(4):31-35.
- ZHU Yong-shu, XIANG Long, YU Zhong-bo, et al. Characteristic analysis of phosphorus loss in typical watersheds of Taihu Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2013(4):31-35. (in Chinese)