

基于产排系数法的南苕河流域面源污染研究

赖阳阳¹, 单骁², 黄美玲³, 潘高峰², 裴梓恒⁴, 杨金艳^{1, 4*}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院碳中和学院, 浙江杭州 311300;

2. 杭州市临安区市政公用和市容环境卫生保障中心, 浙江杭州 311300;

3. 杭州市生态环境局临安分局, 浙江杭州 311100;

4. 浙江农林大学水污染防治研究所, 浙江杭州 311300)

摘要:【目的】研究南苕河流域污染负荷, 为南苕河流域内面源污染防治提供数据支撑。【方法】采用产排系数法和等标污染负荷法估算南苕河流域各乡镇污染负荷并确定负荷率占比最高的污染源。【结果】城镇生活和农村生活污水是南苕河流域面源污染的主要来源, 总等标污染负荷占比达85.60%。其中, 氮磷等污染物在雨水冲刷或径流携带下最终汇入水体, 导致水质恶化。【结论】流域面源污染主要污染物为总磷污染物, 今后的面源污染治理应着重关注此类问题。

关键词: 面源污染; 产排系数法; 负荷; 负荷率

在城镇现代化进程中, 面源污染的危害不容忽视。面源污染主要来自于农业生产、城市地表径流和大气沉降等方面, 具有分散性、隐蔽性、随机性、不易监测和难以量化等特征。随着人口的持续增加、工农业生产的飞速发展, 面源污染在水污染的占比急剧上升, 氮磷等污染物在雨水冲刷或径流携带下, 最终汇入受纳水体, 导致水质恶化, 对水生生态系统产生破坏, 甚至威胁人类健康。在此背景下, 进行面源污染防治有助于缓和和协调经济发展与生态保护之间的矛盾, 促进绿色发展。这与我国“十四五”规划中关于推动绿色发展的目标一致, 有助于实现生态文明建设的新进步。

南苕河流域属长江流域太湖水系, 作为太湖流域上游最大的源头支流, 经青山水库调蓄后流经余杭、瓶窑汇入太湖, 是太湖流域水安全屏障的重要一环。作为浙西重要的农业生产功能区和生态环保区, 其面源污染问题引起了众多学者和管理部门的关注。考虑到种植业引发的面源污染问题, 王莉对秦岭北部余家河流域的污染迁移途径做了分析研究^[1]。游如玥等借助GIS平台采用源强系数法和输出系数模型分析小安溪流域面源污染及水质^[2]。李建勋等利用输出

系数法粗略估算了陕西农业面源污染负荷^[3]。应用数学模型对面源污染进行模拟是当前比较主流的研究手段, 但往往受制于数据精度和水文资料的缺失, 且因不同研究区区域性差异大, 增加了信息的获取难度。而产排系数法和等标污染负荷法因算法简单, 所需参数较少, 通过不同地区产排污系数基于人口或农业生产面积进行核算^[4], 受人为因素影响较小, 污染物产排量估算在一定空间尺度上较为精确, 因此在面源污染研究上得到了广泛应用。本文以南苕河流域临安段为研究对象, 采用等标污染负荷法估算流域2021年各污染源负荷, 旨在为流域面源污染研究的后续治理与防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南苕河流域位于浙西天目山段, 为东苕溪主源, 发源于太湖源镇临目马尖岗, 全长63km, 流域面积653.08km², 比降12.3‰; 临安境内段长55km, 流域出口汪家埠水质断面多年平均径流量13.6m³/s。流域地处中亚热带季风气候区南缘, 温暖湿润, 光照充足, 由于面源污染的治理通常以行政区划为单元进行分区治理, 故选择流域所涵盖的7个乡镇街道为研究区。

1.2 研究方法

本文基于生态环境部2021年印发的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》产排污系数估算南苕河流域各乡镇污染物产排量。运用等标污染负荷法将各污染源排放的污染物总量与该污染物的排

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2024C03249)。

作者简介: 赖阳阳, 硕士研究生。研究方向: 水污染防治与治理。Email: 2021603041052@zafu.edu.cn

通讯作者: 杨金艳, 工程师。研究方向: 水污染防治与治理。Email: 1470975740@qq.com

放标准进行对比分析^[5], 将各污染源置于相同的标准下进行比较, 能够准确反映各污染源对环境影响总量的大小和自身污染程度。

2 流域面源污染现状分析及估算

2.1 农业面源污染

农业种植中的施肥与施药过程是造成农业面源污染的关键原因之一。研究区地处天目山地, 水稻熟制为单季晚稻, 旱地实行油麦轮作。流域内多数耕地改种雷竹、山核桃等经济作物, 以太湖源镇为最^[6]。种植业水污染物(氨氮、总氮、总磷)流失量采用产排污系数法核算, 计算公式如下:

$$P = \sum_{j=1}^n C_g \times e_{gj} + C_y \times e_{yj} \times q \times 10^{-3} \quad (\text{公式2.1})$$

其中, P 指种植业污染物流失量, 单位为t; C_g 指农作物总播种面积单位为 hm^2 ; e_{gj} 指农作物种植过程中第 j 项水污染物流失系数, 单位为 kg/hm^2 ; C_y 指园地面积, 单位为ha; e_{yj} 指园地第 j 项水污染物流失系数, 单位为 kg/hm^2 ; q 为调查年度用于种植业的含氮化肥(含磷化肥)单位面积使用量与2017第二次全国污染普查年度用于种植业的含氮化肥(含磷化肥)单位面积使用量比值。

种植业氨的排放量的核算, 等于农作物总播种

面积、园地面积和相应的氨排放系数及化肥施用量比值相乘, 计算公式如下:

$$A = N_g \times e_g + N_y \times e_y \times q \times 10^{-3} \quad (\text{公式2.2})$$

其中, A 指种植业氨的排放量, 单位为t; N_g 指农作物总播种面积, 单位为 hm^2 ; e_g 指农作物种植过程中氨排放系数, 单位为 kg/hm^2 ; N_y 指园地面积, 单位为 hm^2 ; e_y 指园地氨排放系数, 单位为 kg/hm^2 ; q 为调查年度用于种植业的含氮化肥(含磷化肥)单位面积使用量与2017第二次全国污染普查年度用于种植业的含氮化肥(含磷化肥)单位面积使用量比值。其中, 化肥用量均为折纯用量。种植业氮磷在降雨或灌溉水作用下溶解或悬浮于径流水中, 随径流迁移出田块而导致的农田氮磷流失, 分为农耕地播种过程排放和园地排放两部分。

根据《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》给定的不同地区种植业氮磷流失系数, 浙江种植业氮磷流失系数见表1。基于统计年鉴中流域内农用地和园地面积, 通过上述公式计算, 得出南苕溪流域种植业氮磷流失量结果见表2。

表1 种植业氮磷流失系数

地区	农业播种过程排放 (流失)系数			园地排放 (流失)系数		
	氨氮	总氮	总磷	氨氮	总氮	总磷
浙江省	1.802	15.021	2.445	1.049	10.147	0.62

表2 南苕溪流域种植业氮磷流失量

地区	农用地面积 (hm^2)	农业播种过程排放(流失)量			园地面积 (hm^2)	园地排放(流失)量		
		氨氮(kg)	总氮(kg)	总磷(kg)		氨氮(kg)	总氮(kg)	总磷(kg)
板桥镇	282.07	508.29	4236.97	689.66	—	—	—	—
高虹镇	49.28	88.80	740.24	120.49	—	—	—	—
锦北街道	190.50	343.28	2861.53	465.78	—	—	—	—
锦城街道	274.62	494.86	4125.00	671.43	99.36	104.23	1008.20	61.60
锦南街道	102.12	184.03	1534.02	249.70	0.42	0.44	4.26	0.26
玲珑街道	451.99	814.49	6789.41	1105.13	—	—	—	—
青山湖街道	30.08	54.21	451.87	73.55	—	—	—	—
太湖源镇	1655.33	2982.91	24 864.78	4047.29	—	—	—	—
总计	3036.00	5470.88	45 603.82	7423.03	99.78	104.67	1012.46	61.86

注: 流域内竹产业用地并入农用地计算。

畜禽养殖废水具有有机负荷较高、氨氮含量高等特点。《第二次全国污染源普查公报》数据显示, 我国畜禽养殖业氮磷排污分别占农业面源污染排放总量的42.14和56.45%^[7-8], 是农业领域的重要污染源。

从杭州市生态环境局临安分局提供的规模畜禽养殖数据得到, 2021年南苕溪流域年养殖生猪20 710头、奶牛1100头、肉鸡31 000只、蛋鸡99 000只^[8], 清粪工艺均为干清粪。

本文畜禽养殖业水污染物产生量通过以下公式计算：

$$Q_{ij\text{畜产}} = (q_{ij\text{规模}} \times f_{ij\text{规模}} + q_{i\text{养殖户}} \times f_{ij\text{养殖户}}) \times 10^{-3}$$

$$Q_{j\text{畜产}} = \sum_i^n Q_{ij\text{畜产}}$$

其中，第*i*类畜禽养殖的水污染物产生量等于第*i*类畜禽的养殖量乘以产污系数，畜禽养殖业的水污染物产生量等于5类畜禽（生猪、奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡，下同）养殖的污染物产生量之和。 $Q_{ij\text{畜产}}$ 指第*i*类畜禽养殖第*j*项污染物产生量，单位为t； $q_{ij\text{规模}}$ 指第*i*类畜禽规模化养殖场的存/出栏量，单位为头或羽； $f_{ij\text{规模}}$ 指第*i*类畜禽规模化养殖场第*j*项污染物产污系数，单位为kg/头或kg/羽； $q_{i\text{养殖户}}$ 指第*i*类畜禽养殖户存/出栏量，单位为kg/羽； $f_{ij\text{养殖户}}$ 指第*i*类畜禽规模化养殖户第*j*项污染物产污系数，单位为kg/头或kg/羽； $Q_{j\text{畜产}}$ 指畜禽养殖第*j*项污染物产生量，单位为t。《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》中浙江省各类畜禽的产排污系数见表3。

表3 流域规模畜禽产排污系数及产排量

动物种类	污染物指标	单位	产污系数	污染物产生量 (t)	排污系数	污染物排放量 (t)
生猪	COD	kg/头	75.5	1563.61	1.0047	20.81
	总氮		3.5	72.49	0.1653	3.42
	氨氮		0.4	8.28	0.0498	1.03
	总磷		1.2	24.85	0.0227	0.47
奶牛	COD	kg/头	2170.9	2387.99	6.1694	6.79
	总氮		72.4	79.64	0.6254	0.69
	氨氮		3.3	3.63	0.0466	0.05
	总磷		8.3	9.13	0.04	0.04
肉鸡	COD	kg/羽	2.2	68.20	0.0099	0.31
	总氮		0.1	3.10	0.0007	0.02
	氨氮		0.01	0.31	0.0003	0.01
	总磷		0.02	0.62	0.0001	0.00
蛋鸡	COD	kg/羽	10.4	1029.60	0.0946	9.37
	总氮		0.7	69.30	0.0063	0.62
	氨氮		0.1	9.90	0.0005	0.05
	总磷		0.2	19.80	0.0016	0.16

根据《临安区2022年统计年鉴》提供的调查数据，参考《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》中各类畜禽的产排污系数，2022年南苕河流域规模畜禽养殖污染物产排量见下表4。

表4 流域规模化养殖污染物产排量

指标	COD	总氮	氨氮	总磷
产生量 (t)	5 049.395	224.525	22.124	54.402
排放量 (t)	37.266	4.757	1.141	0.676

农村生活污水包括黑水（人排泄及冲洗粪便产生的高浓度废水）、厨房废水、洗衣和家庭清洁污水、洗浴废水及经营性废水等组成^[9]。农村生活源水污染物产生系数表见表5。本文农村生活污水排放量（万t）=农村常住人口（万人）×人均污水排放系数（L/（人·天））×365（天）/1000，生活污水污染物产生量按照农村常住人口与人均产污强度计算。污染物产生量（t）=农村常住人口（万人）×人均产污强度（g/人·天）×365/100，污染物排放量（t）=污染物产生量（t）×（1-对生活污水进行处理的行政村比例×污染物综合去除率），污染物排放量为污染物产生量与未经处理的污染物所占比例的乘积，计算结果见表6，反映了研究区农村生活污水治理终端建设水平的优劣。

表5 农村生活源水污染物产生系数表

类别	指标名称	单位	产污系数	地区分类
农村生活污水	污水排放系数	L/人·天	62.62	浙江：四区
	污染物产生量	10 ⁴ t	-	
	COD产污强度	g/人·天	41.02	
	氨氮产污强度	g/人·天	2.72	
	总氮产污强度	g/人·天	4.54	
	总磷产污强度	g/人·天	0.30	

表6 农村生活污染物产生量

行政区划名称	农村常住人口 (万人)	污染物产生量 (万t)	COD产污量 (t)	氨氮产污量 (t)	总氮产污量 (t)	总磷产污量 (t)
玲珑街道	2.44	55.67	364.70	24.18	40.36	2.67
锦南街道	1.34	30.69	201.03	13.33	22.25	1.47
锦城街道	1.40	32.01	209.70	13.91	23.21	1.53
锦北街道	0.79	17.97	117.68	7.80	13.02	0.86
青山湖街道	3.23	73.92	484.25	32.11	53.60	3.54
高虹镇	2.29	52.29	342.54	22.71	37.91	2.51
太湖源镇	2.78	63.56	416.38	27.61	46.08	3.05
板桥镇	2.47	56.40	369.44	24.50	40.89	2.70
总计	16.74	382.52	2505.72	166.15	277.33	18.33

注：农村常住人口来源于《临安统计年鉴2022》所载2021年人口数据。

南苕溪流域内农业生产生活污水排放方式以混排排水为主,得益于近年来污水零直排建设工作的有序推进,农村生活污水纳管率逐年提高,但受制于面源污染的难以管控性特点和居民随意搭接管网、排污入河等现象依然存在,农村生活对面源污染的贡献占比始终居高且占绝对比例。其中,COD(2505.72t)与氨氮(166.15t)造成的面源污染压力最大。流域内畜禽养殖规模较小,仅板桥镇与锦城街道有所分布。经调查发现,南苕溪流域畜禽养殖模式均为规模化养殖场,养殖废水均纳管处理,故畜禽养殖面源污染贡献占比极低,对整体水环境影响不明显。

根据《临安统计年鉴2022》及实地考察,研究区域农田多为水田,种植模式为单季晚稻,旱地种植模式多为油麦轮作。流域内除农用地外,农民在山地广泛种植雷竹、毛竹、茶叶等经济作物,施肥以尿素和复合肥为主,普遍施肥时间在4月、8月和10月,期间会有少量追肥的情况。由于估算研究区农业种植污

染负荷时不考虑COD的影响,使得农业种植污染负荷量显著低于农村生活污染负荷。

2.2 城市面源污染

城镇生活污水污染物产生量按照生活污水排放量和产污系数计算。产污系数为生活污水平均浓度。污染物产生量=污水排放量×产污系数。最终排入环境的污染物的量=污染物产生量-各种污水处理设施去除量。

表7 城镇生活源水污染物产生系数表

类别	指标名称	单位	产污系数	地区分类
	人均综合生活用水量	L/人·天	203	
	折污系数	无量纲	0.85	
城镇生活污染物	COD产污强度	mg/L	340	杭州市
	氨氮产污强度	mg/L	32.6	
	总氮产污强度	mg/L	44.8	
	总磷产污强度	mg/L	4.27	

表8 城镇生活污染物产生量

行政区	城镇居民(万人)	生活污水产生量(万t)	生活污水排放量(万t)	COD产生量(t)	氨氮产生量(t)	总氮产生量(t)	总磷产生量(t)
锦城街道	7.59	478.23	450.23	1530.79	146.78	201.70	19.22
锦北街道	3.52	221.98	208.98	710.53	68.13	93.62	8.92
青山湖街道	1.13	71.41	67.23	228.57	21.92	30.12	2.87
总计	12.24	771.62	726.44	2469.89	236.83	325.44	31.01

注:城镇计算人口采用流域内临安主城区街道非农人口。

根据《生活源产排污系数手册》,研究区属杭州市,生活源水污染产生系数表见表7。城镇生活污水产生量(万t)=城镇常住人口(万人)×人均综合生活用水量系数(L/(人·天))×产污系数×365(天)/1000^[10]。计算结果见表8。流域面源污染排放(流失)量见表9。

表9 流域面源污染排放(流失)量

污染物排放量	COD(t)	总氮(t)	氨氮(t)	总磷(t)
种植业	-	46.62	5.58	7.48
畜禽养殖	37.27	4.76	1.141	0.68
农村生活	2505.72	277.33	166.15	18.33
城镇生活	2469.89	325.44	236.83	31.01
总计	5012.88	654.13	409.70	57.50

注:前文中种植业流失量单位为kg,本表换算为t。

3 结果分析

3.1 水质分析

如图1所示,本文选取流域出口汪家埠水质断面进行水质评价,根据2021—2023年水环境监测数据及当地陆域污染情况,选取总氮、氨氮、高锰酸盐指数、总磷等4个指数进行水质分级评价。结果表明,南苕溪汪家埠水质断面级别为II级轻污染。总体而言,丰水期水质要劣于平水期,可能是因为山地地形原因导致雨水快排快泄入河,引起短时间内污染物升高。同时,通过对水质指标进行相关性分析发现,总氮、总磷等污染物指标与气温、氧化还原电位等指标显著相关,与断面流量相关性较低,可能是由于上游面源污染经青山水库调蓄后排入下游河网,对出口断面整体水质变化影响不明显。氨氮及高锰酸盐指数受流量影响较大,这可能是因为河水流量的增加通常会

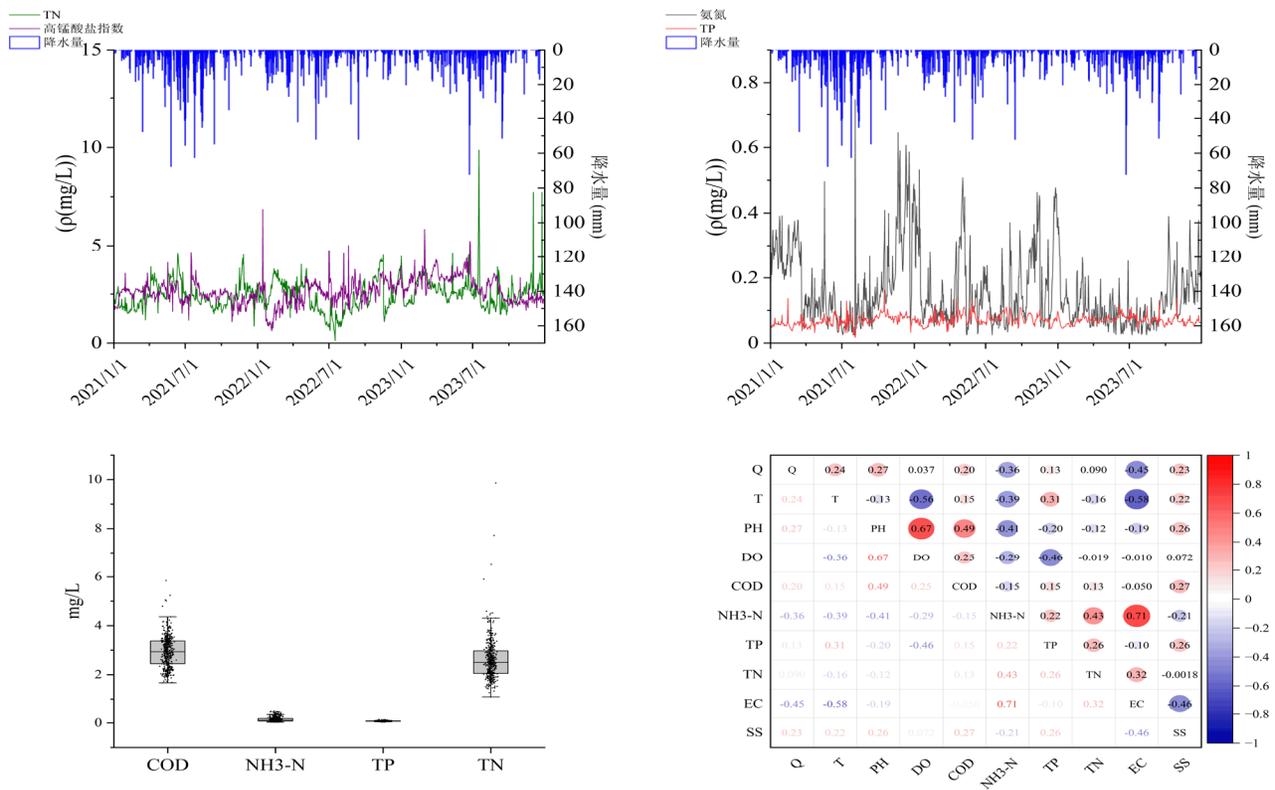


图1 流域出口水质断面污染物变化规律及相关性

伴随着水体中氧气含量的增加，加速了氨氮转化为硝酸盐的过程。

3.2 面源污染分析

利用产排系数法计算得出南苕溪流域种植业、畜禽养殖、农村生活污水和城镇生活污水的总氮输出负荷量为542.96t，COD输出负荷量5012.88t，氨氮为520.88t，总磷负荷量为57.50t。

采用等标污染负荷法计算各污染物负荷贡献率，由表10可知流域面源污染的等标污染负荷贡献率顺序为城市生活污水（50.44%）>农村生活污水（42.65%）>种植业（6.22%）>畜禽养殖（0.69%）。虽然近年来临安区污水零直排工作开展

卓有成效，但部分市政道路现状雨污水管线依旧存在雨污水合流，居民废水接入雨水井内，进入雨水主管等现象。同时，部分管道老化破裂、积水严重、运行不畅也是主要原因。

研究区COD、总氮、氨氮、总磷的总等标污染负荷比分别为5.47%、14.27%、5.94%和71.33%，流域最严重的污染负荷为总磷。最可能的原因是城乡生活污水中洗涤废水、厨房废水私接入雨水立管、出户管私接入雨水沟等原因造成高磷废水进入水体。

以上现状问题的存在，使得生活污水通过管网排至水体，对水环境造成直接影响。因此，今后的面源污染治理上应着重关注此类问题。

表10 污染物等标负荷表

污染物指标	等标污染负荷量 $t \cdot a^{-1} \cdot mg^{-1} \cdot L$					总等标污染负荷比%				
	COD	总氮	氨氮	总磷	总计	COD	总氮	氨氮	总磷	总计
种植业	-	46.61	5.58	233.05	-	-	1.02	0.12	5.08	6.22
畜禽养殖	1.86	4.76	1.14	23.80	1.86	0.04	0.10	0.02	0.52	0.69
农村生活	125.29	277.33	166.15	1386.65	125.29	2.73	6.05	3.62	30.24	42.65
城镇生活	123.49	325.44	236.83	1627.20	123.49	2.69	7.10	5.17	35.49	50.44
总计	250.64	654.14	409.70	3270.70	250.64	5.47	14.27	8.94	71.33	100.00

流域面源污染COD、总氮、总磷、氨氮的等标污染空间负荷分布如图2所示。由图可以直观得出，锦城街道的等标污染负荷贡献率最高，其次是青山湖街道，太湖源镇的等标污染负荷贡献率最高，其次是青山湖街道，太湖源镇大面积的雷竹种植及化肥施用可能是其磷等标负荷相对较高的主要原因。

太湖源镇，除锦城街道、青山湖街道因高密度居住污染物排放量相对较大等原因外，太湖源镇大面积的雷竹种植及化肥施用可能是其磷等标负荷相对较高的主要原因。

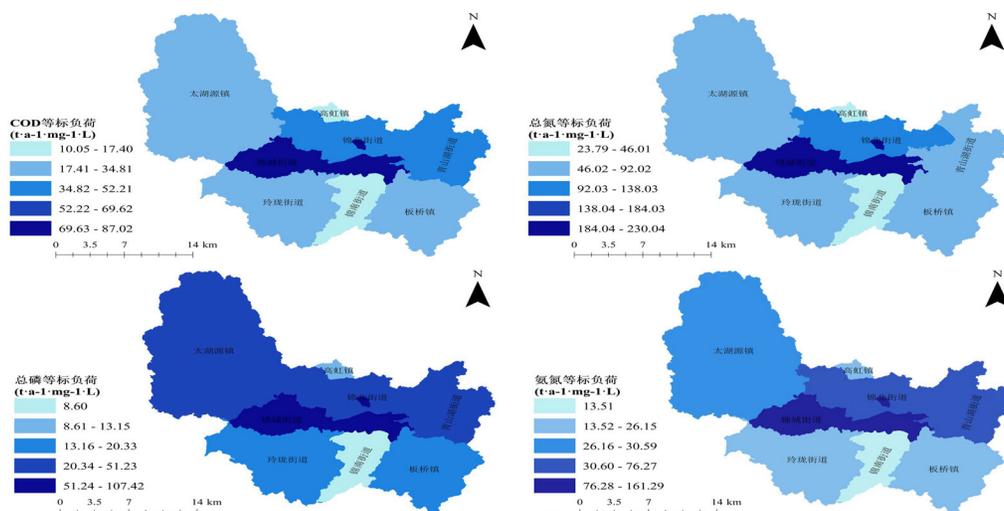


图2 各乡镇街道等标污染负荷

4 结论和建议

本文针对南苕河流域面源污染现状，运用产排污系数法估算流域各街道乡镇面源污染。采用等标污染负荷法综合考虑各乡镇氮磷负荷强度及不同污染源的贡献率，结论和建议如下。

(1) 南苕河流域面源污染防控仍有一定压力，污染物以总磷尤为突出。其中，城镇生活污染最大，应在后续管控过程中加以注意。

(2) 城镇生活和农村生活污水是南苕河流域面源污染的主要来源，总等标污染负荷占比达85.6%。氮磷等污染物在雨水冲刷或径流携带下最终汇入水体，导致水质恶化。

(3) 从全局角度分析，各污染物等标负荷空间负荷的关键源区在锦城街道，这是由于流域腹部地区人为活动集聚。从农业源角度分析，锦南街道污染负荷较少，太湖源镇污染负荷较大，应重点关注太湖源镇的种植业总磷及氨氮排放。从污染物角度分析，流域面源污染主要污染物为TP，与断面水质结果评价符合，最可能的诱因是城乡居民生活高磷废水接入雨水管导致雨污河流与管道老化运行不畅，今后的面源污染治理应着重治理此类问题。

参考文献

[1] 王莉. 秦岭北麓俞家河流域农业面源污染特征及种植业污染途径分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

[2] 游如玥, 敖天其, 朱虹, 等. 小安溪流域水环境污染综合评估[J]. 水力发电, 2020, 46 (11): 6-10+64.

[3] 李建勋, 李明万, 刘晓雨, 等. 基于输出系数法的陕西农业面源污染负荷研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39 (4): 523-529.

[4] 杨文慧, 于新花, 杨彦霞. 农业面源污染负荷计算方法及输出系数取值的分析[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43 (10): 43-48.

[5] 武升, 张俊森, 张东红, 等. 小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (6): 710-716.

[6] 祝小祥. 临安耕地质量与配方施肥[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014.

[7] 富馨毅. 渭河流域关中段非点源污染模拟及最佳管理措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[8] 丁建华, 沈旭, 常文婷, 等. 基于SWAT模型的南苕河流域面源污染时空格局研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45 (12): 1654-1659.

[9] 陈武权, 杨庆榜, 杨斌. 基于产排污系数法的鄱阳湖滨湖区总磷排放量测算研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44 (7): 960-965.

[10] 杭州市生态环境局临安分局. 2022年度杭州市临安区生态环境状况公报[R]. 2023.