

三峡库区典型流域水质时空特征及污染防控策略

李刚浩^{1,2}, 范先鹏¹, 夏颖^{1*}, 刘宏斌³, 吴茂前¹, 张富林¹,
黄敏², 翟丽梅³, 周继文⁴, 孔祥琼⁴, 程子珍¹

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所/国家农业环境潜江观测实验站/湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心, 武汉 430064; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4. 兴山县农业农村局, 兴山 443700)

摘要: 为了解三峡库区典型小流域不同土地利用类型下水质的变化特征, 于2015—2020年对三峡库区长坪小流域开展水质监测, 对不同土地利用类型水体中的总氮(Total Nitrogen, TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、总磷(Total Phosphorus, TP)、可溶态总磷(Dissolved Total Phosphorus, DTP)和颗粒态总磷(Particulate Phosphorus, PP)浓度的时空变化规律进行研究, 识别流域内主要氮磷污染源, 从而提出针对性的污染防控策略。结果表明: 1) 不同土地利用类型氮磷输出浓度从大到小依次为村庄、坡耕地、林地和水库, 其TN平均浓度分别为8.29、2.88、1.57和1.43 mg/L, TP平均浓度分别为0.25、0.13、0.09和0.07 mg/L。2) 不同土地利用类型的水质在汛期和非汛期存在差异, 村庄氮磷输出浓度为非汛期高于汛期, 坡耕地、林地和水库则表现为汛期高于非汛期。3) 内梅罗综合污染指数评价结果表明林地和水库的污染程度均为清洁水平, 坡耕地污染程度为轻污染水平, 村庄受散养生猪数量的影响, 污染程度从污染水平转变为重污染水平。4) 长坪小流域TN和TP年输出负荷总量分别为4 278.59和364.93 kg/a。畜禽养殖源是小流域氮磷最主要的污染源, 其TN和TP的输出负荷分别占流域总负荷的45.69%和71.77%。坡耕地的TN和TP单位面积污染负荷分别是村庄的7.58%和1.79%, 与村庄相比, 坡耕地具有显著的低污染特征, 因此, 以坡耕地消纳村庄污水和畜禽粪便, 可促进流域内粪污的就地消纳, 达到多源共治的效果。基于小流域不同土地利用类型的水质特征和生态系统服务功能, 将流域划分为林草水源涵养区、村庄污染控制区和坡耕地水土保持区, 并进行分区协同防控, 促进流域农业面源污染系统高效治理。

关键词: 水质; 土地利用; 空间分布; 三峡库区; 典型流域; 农业面源污染; 分区协同防控策略

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.013

中图分类号: X832

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-17-0118-09

李刚浩, 范先鹏, 夏颖, 等. 三峡库区典型流域水质时空特征及污染防控策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 118-126.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.013 <http://www.tcsae.org>

Li Ganghao, Fan Xianpeng, Xia Ying, et al. Spatio-temporal characteristics of water quality and pollution prevention strategies in typical watersheds in the Three Gorges reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 118-126. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.013 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业生产活动和农村生活产生的氮(N)和磷(P)是造成水体富营养化的重要因素^[1]。近年来, 随着点源治理力度的增大, 由农业生产活动和农村生活引起的农业面源污染已成为目前水体氮磷污染的最主要来源^[2]。因此, 研究不同土地利用类型对流域水质变化的作用, 对流域的污染防控和居民居住环境改善具有重要的意义。

土地利用类型作为水质变化的主要因素之一, 随着时空尺度的变化对河流水质产生不同的影响^[3]。闵惠琳等^[4]的研究发现各形态氮的浓度均表现出村庄最高, 其次为梯田和河流, 林地浓度最低的分布特征; 王晓燕等^[5]对石

匣小流域不同土地利用类型中氮磷流失特征的研究发现, 径流中氮磷的浓度排序为村庄>坡耕地>林果地>荒草地。林地和草地能够拦蓄污染物, 改善水质, 建设用地和坡耕地导致水质恶化^[6-7]。彭勃等^[8]对清源河小流域的研究发现, 耕地和建设用地面积越大, 临近水体污染越严重, 林地和草地则对水体污染物输出具有抑制作用。吴东等^[9]在兰陵溪小流域的研究发现, 氮素输出浓度与居民区和坡耕地正相关, 与林地负相关, 居民区和坡耕地是主要的氮素输出源。季节性的变化对流域水质有重要影响, 华玲玲等^[10]对古夫河小流域的研究表明, 流域氮磷输出浓度在丰水期最高, 梁爽等^[11]对鄂西长江小流域的研究发现氮素浓度呈现春夏高, 秋冬低的特征。然而, 不同流域的土地利用类型不同, 受自然和人类活动的影响, 土地利用和水质之间的关系并不总是一致, 流域水质的空间和时间分布特征仍不确定。

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程之一, 在长江流域经济开发与水文治理中发挥了重要作用, 取得了

收稿日期: 2022-04-27 修订日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A2025)

作者简介: 李刚浩, 研究方向为农业面源污染防治。Email: lghdc20@163.com

※通信作者: 夏颖, 博士, 副研究员, 研究方向为农业面源污染防治研究。

Email: xiayinghappy105@163.com

显著的经济效益和社会效益，但同时也对生态环境造成了影响^[12]。三峡工程的建成，使库区的土地利用类型发生变化，增加了对陡坡地的开发利用，且库区人口稠密，土地利用强度大，再加上不合理的畜禽养殖和农事操作，库区农业面源污染问题缺少有效处理^[13]。三峡库区水土流失严重，大量氮磷营养物质随地表径流和泥沙流失而流失，导致三峡库区水质下降和水体的富营养化^[14-15]。因此有必要深入了解该地区不同土地利用类型对水质的影响，根据不同土地利用类型的水质特征，提出系统高效的污染防控策略。

小流域是一个相对独立的系统，是污染产生的源头，可以作为面源污染的最佳研究单元^[16]。不同土地利用类型水质特征具有差异性，对不同土地利用类型的农业面源污染防控，需要制定针对性的防控策略。因此，本研究选取三峡库区上游具有较好独立性和封闭性的长坪小流域作为研究对象，于 2015—2020 年在长坪小流域进行长期连续的水质监测，结合 GIS 技术，探讨流域内不同土地利用类型对水质变化的影响，并识别流域内氮磷的主要污染源，基于不同土地利用类型水质的保护与治理需求，提出流域农业面源污染的分区协同防控策略，以期三峡库区氮磷污染的系统高效防控、水环境改善、土地利用方式优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域长坪小流域（110°44'21"~110°46'17"E，31°18'30"~31°20'1"N）位于湖北省宜昌市兴山县，总面积 330 hm²，是典型的农林复合小流域。流域气候为亚热带季风湿润气候，年平均气温 14.9~18.5℃，年均降雨量 1 000~1 300 mm，降雨季节分布不均，降雨主要集中在 4—9 月，具有夏季暴雨多、强度大、历时短的特点，根据当地实际降雨情况将 4—9 月确定为丰水期，10 月至次年 3 月确定为枯水期。小流域地形为两边高、中间低，属于典型丘陵山区，集水区径流汇聚于唯一出口后流入古夫河，再汇入香溪河。主要土壤类型为黄棕壤，土层浅薄，抗蚀性差。主要土地利用类型为林地、坡耕地和村庄，其中，林地面积最大，占流域总面积的 64.11%，坡耕地占流域总面积的 28.73%，村庄占流域总面积的 5.17%，具有村庄内人畜混居普遍、地块高度分散等特征。主要种植作物为玉米、油菜、马铃薯等，主要种植模式为玉米-油菜轮作。该小流域在地形地貌、气候、土地利用、土壤类型和种植模式方面具有典型的三峡库区特征。

1.2 监测点布置

长坪小流域村庄、坡耕地、林地和水库的土地面积之和占长坪小流域总面积的 99%以上，因此在小流域自上而下选取 11 处水质监测点分别代表村庄、坡耕地、林地和水库对小流域氮磷污染分布的影响（图 1）。其中，村庄、坡耕地、林地选取各自汇水范围内的支流作为采样点，采样点位于支流与干流交汇的上方，水库采样点位于水库出水口。

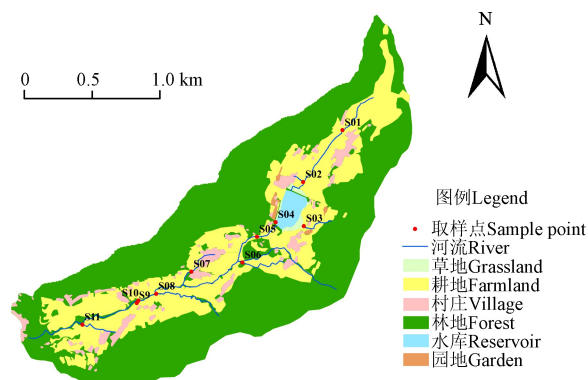


图 1 流域土地利用类型及采样点分布

Fig.1 Land use types and sample point distribution within the watershed

1.3 水样采集与分析

水样采集时间为 2015 年 1 月—2020 年 12 月，采集频率为每 5 d 采集一次，采样位置位于河道中央，在所选断面采集 0.5 m 以上表层水混合水样（至少 5 点混合），以保证水质样品的代表性。使用 500 mL 聚乙烯瓶采集水样，水样采集后放置于冰箱冷冻保存，并及时送回实验室分析测试。测定指标为总氮（TN）、硝态氮（NO₃⁻-N）、氨氮（NH₄⁺-N）、总磷（TP）和可溶态总磷（DTP）。TN 采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定（HJ636—2012），NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定（HJ/T346—2007），NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定，TP 采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法（GB11893—1989）测定，水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后，测定 DTP，测定方法与 TP 相同；颗粒态总磷（PP）浓度为 TP 浓度与 DTP 浓度之差。

1.4 研究方法

1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法^[17]是用来评价单项水质指标是否达到水体功能标准及其超标程度。计算公式为

$$P_i = D_i / D_{i0} \quad (1)$$

式中 P_i 为单因子污染指数； D_i 为该断面第 i 项污染指标的年平均值； D_{i0} 为第 i 项污染指标的评价标准值。

1.4.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法最早是由 Nemerow^[18]提出的，将某单项水质指标的实测浓度与地表水环境质量中的标准限值进行对比，计算出综合指数，并根据分级标准评价水体污染程度。内梅罗污染指数兼顾了单因子污染指数的平均值和最大值，且突出最大污染指标对水体污染的影响，更能反映水体的实际污染程度^[19]。具体公式如下：

$$I = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中 I 为内梅罗指数， P_{\max} 是 P_i 的最大值， P_{ave} 是 P_i 的平均值。

1.4.3 输出系数模型法

输出系数模型是通过研究区域内不同污染源类型的污染负荷进行求和，最后得到该区域的污染总负荷，其模型方程^[20]如下：

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i \tag{3}$$

式中 L 表示污染物的总输出负荷, kg/a ; E_i 表示第 i 种污染源的输出系数, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 或 $\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{a})$ 或 $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{a})$; A_i 表示第 i 种畜禽的数量 (头)、农村人口数 (人) 或第 i 种土地利用类型的面积, hm^2 。

农业面源污染来源主要包括农村生活源、畜禽养殖源和种植业源, 农业面源污染输出系数受农村生活方式、养殖模式、种植模式和土地利用类型的影响而有所不同^[21]。因此, 本研究在综合考虑小流域农村生产生活方式的基础上, 借鉴三峡库区农业面源污染相关研究^[22-25], 确定各污染源的输出系数。具体输出系数取值见表 1。

表 1 各污染源输出系数
Table 1 Output coefficients for different sources of contamination

项目 Item	农村生活 Rural Life/(kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)			畜禽养殖 Livestock farming/ (kg·头 (只) ⁻¹ ·a ⁻¹)		土地利用类型 Land use type/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	
	农村人口 Rural residents	生活污水 Domestic sewage	生活垃圾 Domestic garbage	猪 Pig	家禽 Poultry	坡耕地 Slope farmland	林地 Forest
总氮 Total Nitrogen (TN)	0.98	0.07	0.16	5.78	0.04	11.60	2.70
总磷 Total Phosphorus (TP)	0.026	0.007	0.03	0.77	0.007	0.31	0.19

1.4.4 污染防控分区划分

参照《全国生态功能区划 (修编版)》划分方法, 从流域面源污染治理角度, 根据流域内不同土地利用类型水质污染程度和生态系统服务功能差异, 将流域内的土地利用类型划分为不同的防控分区。

1.4.5 数据分析

采用 Excel 2020 进行数据处理, 采用 Origin 2018 绘图, 采用 ArcGIS 10.2 绘制流域土地利用类型及采样点分布图。

2 结果与分析

2.1 水质的空间变化特征

2015—2020 年长坪小流域不同土地利用类型的水质特征统计分析见表 2。TN 平均浓度从高到低依次为村庄、坡耕地、林地、水库, 村庄 TN 浓度最高, 平均浓度为

8.29 mg/L, 坡耕地 TN 平均浓度次之, 为 2.88 mg/L, 林地和水库 TN 平均浓度较低, 分别为 1.57 和 1.43 mg/L。NO₃⁻-N 输出浓度从高到低依次为村庄、坡耕地、林地、水库, NO₃⁻-N 是氮素流失的主要形态, 占 TN 的 55.24%~81.60%。NH₄⁺-N 平均浓度变化规律与 TN 和 NO₃⁻-N 不同, 从高到低依次为村庄、水库、林地、坡耕地, 不同土地利用类型的 NH₄⁺-N 浓度均较低, 村庄、水库、林地、坡耕地 NH₄⁺-N 平均浓度分别为 0.51、0.22、0.15、0.11 mg/L。TP 平均浓度从高到低依次为村庄、坡耕地、林地、水库, 平均浓度分别为 0.25、0.13、0.09 和 0.07 mg/L。综上, 长坪小流域各土地利用类型中, 村庄的氮磷输出浓度最高, 坡耕地次之, 林地和水库的氮磷输出浓度均较低。同时在长期监测中发现, 氮磷浓度变化较大, 原因可能是受土地利用类型、降雨、施肥和时空变化等因素的影响。

表 2 不同土地利用类型的各形态氮磷浓度统计分析
Table 2 Statistical analysis of nitrogen and phosphorus concentrations in different land use types

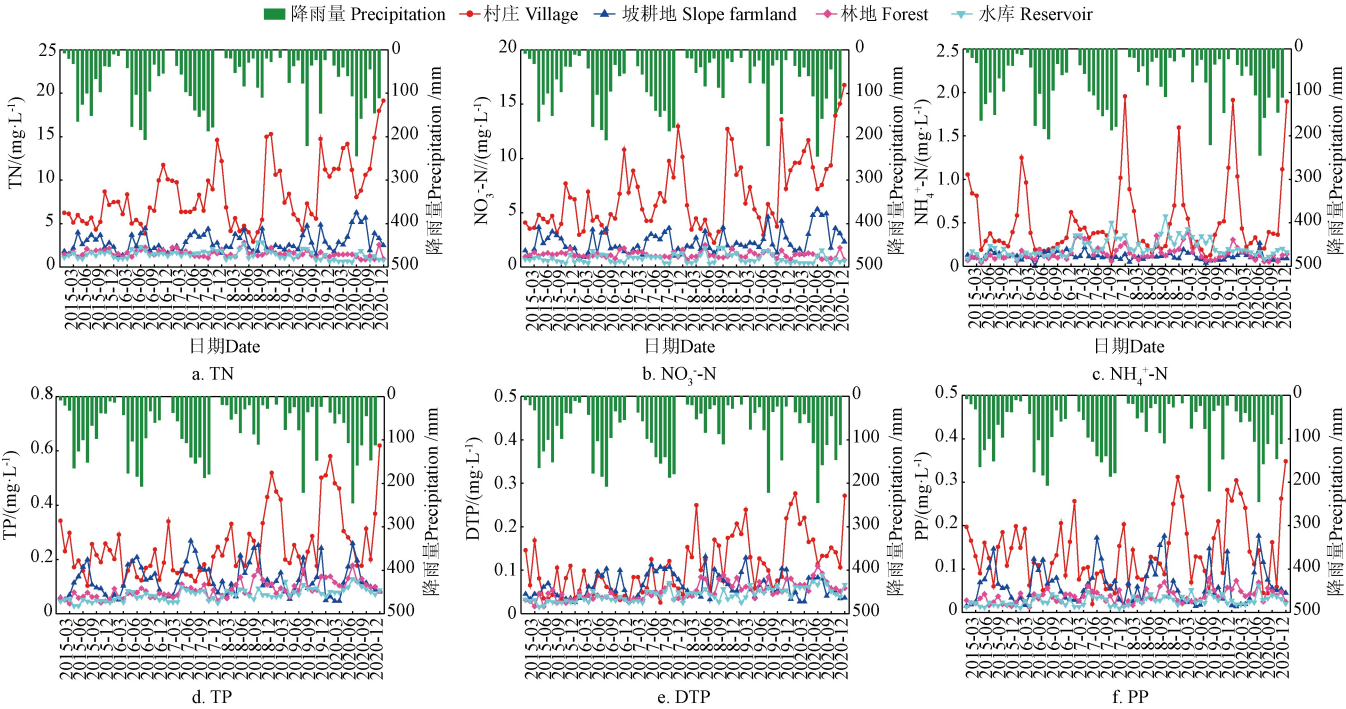
类型 Type	TN			NO ₃ ⁻ -N			NH ₄ ⁺ -N			TP		
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean
村庄 Village	19.14	2.92	8.29a	16.76	2.23	6.73a	1.96	0.10	0.51a	0.62	0.10	0.25a
坡耕地 Slope farmland	6.28	1.15	2.88b	5.34	0.82	2.35b	0.27	0.03	0.11c	0.27	0.05	0.13b
林地 Forest	2.82	0.83	1.57c	2.03	0.65	1.14c	0.39	0.04	0.15c	0.18	0.04	0.09c
水库 Reservoir	2.87	0.55	1.43c	1.79	0.28	0.79c	0.58	0.06	0.22b	0.13	0.03	0.07c

注: 不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different letters represents significant difference at $P<0.05$.

2.2 水质的时间变化特征

长坪小流域不同土地利用类型氮磷浓度表现出较强的时间异质性 (图 2)。对于不同形态的氮浓度而言, 村庄 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度峰值多出现于非汛期的 11 月至次年 1 月, 村庄非汛期的 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度分别为 10.14、8.23 和 0.75 mg/L, 高于汛期的 6.44、5.23 和 0.26 mg/L。与村庄不同, 坡耕地 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度峰值则出现在每年汛期的 5—8 月。林地和水库不同形态氮浓度没有表现出明显的季节性差异。对于不同形

态的磷浓度而言, TP 与 TN 的季节变化规律相似, 村庄非汛期 TP 浓度为 0.31 mg/L, 高于汛期的 0.19 mg/L, 坡耕地汛期 TP 浓度为 0.15 mg/L, 高于非汛期的 0.11 mg/L。林地和水库 TP 浓度较低且变化范围较小。DTP 和 PP 的变化规律与 TP 基本一致, 村庄 DTP 和 PP 浓度峰值多出现在 11 月至次年 2 月, 与之不同, 坡耕地、林地和水库 DTP 和 PP 浓度峰值则多出现在汛期的 6—7 月。从年际尺度看, 村庄氮磷浓度呈波动上升趋势, 坡耕地、林地和水库没有明显变化。



注：DTP 为可溶态总磷；PP 为颗粒态总磷。下同。
Note: DTP is dissolved total phosphorus; PP is particulate phosphorus. Same below.

图 2 不同形态氮磷浓度月变化趋势
Fig.2 Monthly trends in nitrogen and phosphorus concentrations in different forms

对不同形态氮磷浓度和降雨量进行 Pearson 相关性分析 (表 3) 发现, 村庄的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、PP 浓度和月降雨量呈极显著负相关 ($P<0.01$), DTP 浓度和月降雨量呈显著负相关 ($P<0.05$)。与村庄不同, 坡耕地的 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、DTP 浓度和月降雨量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 林地的 TP、PP 浓度和月降雨量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 水库的 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、颗粒态总磷 (PP) 浓度和月降雨量呈极显著正相关 ($P<0.01$)。从整体上看, 随着降雨量的增加, 村庄氮磷浓度逐渐降低, 坡耕地、林地和水库的氮磷浓度逐渐增加, 且坡耕地氮磷浓度与降雨量的正相关性高于林地和水库。

表 3 不同形态氮磷浓度与降雨量的相关性分析						
Table 3 Correlation analysis of different forms of nitrogen and phosphorus concentrations with rainfall						
土地利用类型 Land use type	TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	DTP	PP
村庄 Village	-0.155	-0.064	-0.518**	-0.512**	-0.278*	-0.571**
坡耕地 Slope farmland	0.770**	0.729**	0.023	0.643**	0.407**	0.628**
林地 Forest	-0.015	0.023	-0.403	0.314**	0.232*	0.322**
水库 Reservoir	0.333**	0.327**	-0.053	0.323**	0.229	0.330**

注: *和**分别表示在 $P<0.05$ 水平相关和 $P<0.01$ 水平相关。
Note: * and ** indicate correlation at the $P<0.05$ level and the $P<0.01$ level, respectively.

2.3 不同土地利用类型水质的综合评价

基于长坪小流域 2015—2020 年的水质监测数据, 采用单因子污染指数法和内梅罗污染指数法相结合的方法, 执行 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》V 类标

准来综合评价不同土地利用类型水体水质, 水质评价结果见表 4。

表 4 不同土地利用类型年际水质评价结果								
Table 4 Annual water quality evaluation results for different land use types								
年份 Year	类型 Type	单因子指数及等级 Single factor index and grade				综合指数及程度 Comprehensive index and degree		超标项 Over-proof item
		TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	等级 Grade	I	程度 Degree	
2015	村庄	2.88	0.17	0.51	劣V	2.20	污染	TN
	坡耕地	1.42	0.07	0.40	劣V	1.09	轻污染	TN
	林地	0.93	0.05	0.14	V	0.71	清洁	/
	水库	0.69	0.07	0.15	V	0.53	清洁	/
2016	村庄	3.63	0.24	0.54	劣V	2.77	污染	TN
	坡耕地	1.48	0.07	0.40	劣V	1.14	轻污染	TN
	林地	0.90	0.08	0.26	V	0.70	清洁	/
	水库	0.80	0.07	0.17	V	0.62	清洁	/
2017	村庄	4.52	0.26	0.59	劣V	3.43	重污染	TN
	坡耕地	1.57	0.07	0.38	劣V	1.21	轻污染	TN
	林地	0.85	0.10	0.17	V	0.65	清洁	/
	水库	0.79	0.15	0.18	V	0.62	清洁	/
2018	村庄	3.99	0.29	0.68	劣V	3.05	重污染	TN
	坡耕地	1.45	0.08	0.43	劣V	1.12	轻污染	TN
	林地	0.94	0.08	0.42	V	0.75	清洁	/
	水库	0.67	0.14	0.30	V	0.54	清洁	/
2019	村庄	4.08	0.33	0.91	劣V	3.14	重污染	TN
	坡耕地	1.69	0.08	0.46	劣V	1.30	轻污染	TN
	林地	0.73	0.09	0.36	V	0.58	清洁	/
	水库	0.82	0.13	0.26	V	0.64	清洁	/
2020	村庄	6.41	0.26	1.10	劣V	4.88	重污染	TN、TP
	坡耕地	1.87	0.05	0.48	劣V	1.44	轻污染	TN
	林地	0.67	0.06	0.30	V	0.53	清洁	/
	水库	0.50	0.08	0.26	V	0.41	清洁	/

注: I 为内梅罗指数。
Note: I is Nemerow index.

从 TN 污染指数看, 2015—2020 年间, 村庄、坡耕地、林地和水库的 TN 污染指数变化范围分别是 2.88~6.41、1.42~1.87、0.67~0.94、0.50~0.82, 村庄和坡耕地 TN 污染指数均大于 1, 林地和水库的 TN 污染指数小于 1, 村庄和坡耕地的 TN 超标。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染指数均小于 1, TP 污染指数总体小于 1, 长坪小流域水质超标项目主要为 TN。单因子评价结果表明 2015—2020 年村庄和坡耕地水质均为劣 V 类水。内梅罗综合污染指数评价结果显示, 林地和水库的污染程度均为清洁水平, 坡耕地污染程度为轻污染水平, 村庄的污染程度从污染水平转变为重污染水平。水质的综合评价结果表明, 水质污染程度从重到轻为村庄、坡耕地、林地、水库。

从表 4 可知, 村庄内梅罗污染指数呈增加趋势, 内梅罗污染指数从 2015 年的 2.20 增加到 2020 年的 4.88, 且村庄的内梅罗污染指数显著高于其他土地利用类型, 村庄水质的恶化使小流域整体水质的污染程度不断增加。坡耕地内梅罗污染指数呈缓慢增加趋势, 这可能与化肥的使用量增加有关。林地和水库的内梅罗污染指数变化稳定, 水质未受到明显污染。

2.4 不同污染源的氮磷输出负荷分析

从表 5 可以看出, 长坪小流域 TN 和 TP 输出负荷总量分别为 4 278.59 和 364.93 kg/a。畜禽养殖源是长坪小流域最主要的污染源, 其 TN 输出负荷为 1 954.84 kg/a, TP 输出负荷为 261.92 kg/a, 分别占流域 TN 和 TP 输出负荷总量的 45.69%和 71.77%, 其中生猪养殖氮磷输出负荷最高, 占畜禽养殖源氮磷输出负荷的 95%以上。因此, 有效控制畜禽养殖源, 是提高小流域水质的关键所在。农村生活源的 TN 和 TP 的输出负荷分别占流域 TN 和 TP 输出负荷总量的 15.30%和 9.18%。长坪小流域主要土地利用类型为林地和坡耕地, 分别占流域面积的 64.11%和 28.73%, 因此林地和坡耕地的氮磷输出负荷也较高, 坡耕地和林地的 TN 输出负荷总量分别为 1 098.52 和 570.51 kg/a, 分别占流域 TN 输出负荷总量的 25.67%和 13.34%, 坡耕地和林地的 TP 输出负荷总量分别为 29.35 和 40.15 kg/a, 分别占流域 TP 输出负荷总量的 8.04%和 11.01%。畜禽养殖源和种植业源是小流域的主要污染源, 是影响小流域水质的关键所在。

表 5 不同污染源氮磷污染负荷及贡献率

Table 5 Nitrogen and phosphorus pollution load and contribution rate of different pollution sources

污染源 Pollutant source		TN		TP	
		负荷 Load/(kg·a ⁻¹)	比例 Percent/%	负荷 Load/(kg·a ⁻¹)	比例 Percent/%
农村生活 Rural Life	农村人口	532.36	12.44	13.83	3.79
	生活污水	37.24	0.87	3.72	1.02
	生活垃圾	85.12	1.99	15.96	4.37
畜禽养殖 Livestock farming	猪	1 918.96	44.85	255.64	70.05
	家禽	35.88	0.84	6.28	1.72
土地利用类型 Land use type	坡耕地	1 098.52	25.67	29.35	8.04
	林地	570.51	13.34	40.15	11.01
总计 Total		4 278.59	100	364.93	100

2.5 分区协同防控

以三峡库区典型流域长坪小流域为例, 首先按照不同土地利用类型水质污染程度分为清洁、轻污染和重污染; 再参照《全国生态功能区划(修编版)》中生态系统服务功能类型, 将流域内不同土地利用类型的生态系统服务功能分为水源涵养、人居保障和水土保持; 综合土地利用类型、污染程度和生态系统服务功能, 最终将流域防控分区分为林草水源涵养区、村庄污染控制区和坡耕地水土保持区(表 6)。

表 6 防控分区划分

Table 6 Division of prevention and control zones

土地利用类型 Land use type	污染程度 Degree of pollution	生态系统服务 Services of eco-system	防控分区 Prevention and control partitions	防控目标 Partition target
林地、水库 Forest, Reservoir	清洁	水源涵养	林草水源涵养区	清水保护
村庄 Village	重污染	人居保障	村庄污染控制区	污染控制
坡耕地 Slope farmland	轻污染	水土保持	坡耕地水土保持区	水土保持

结合流域内污染特征和不同分区的防控目标, 制定分区协同防控策略, 该策略包括 3 个方面内容:

1) 建立防控分区。将流域分为林草水源涵养区、村庄污染控制区和坡耕地水土保持区。林草水源涵养区: 林地是长坪小流域最主要的土地利用类型, 林地面积占流域总面积的 64.11%, 林地出水水质较好(TN 1.57 mg/L, 表 2)且常年稳定, 污染程度为清洁水平(表 4), 该分区生态系统服务功能为水源涵养, 对该区域产生的清水应采取保护策略, 避免清水过村后遭受污染。村庄污染控制区: 该分区面积 17.04 hm², 占流域总面积的 5.17%, TN 和 TP 的污染负荷却分别占流域总污染负荷的 60.99%和 80.95%, 水质较差(污染程度为重污染, 表 4), 同时该分区存在着人畜混居普遍、畜禽粪便露天堆置遇雨流失问题突出的现象, 该分区生态系统服务功能为人居保障, 应加强污水和粪污的收集、处理和利用, 从源头上控制氮磷污染的输出。坡耕地水土保持区: 该分区占流域总面积的 28.73%, TN 和 TP 的污染负荷分别占流域总污染负荷的 25.67%和 8.04%(表 5), 坡耕地周边水体 TN 和 TP 浓度分别为 2.88 和 0.13 mg/L(表 2), 污染程度属于轻污染, 该分区生态系统服务功能为水土保持, 应以控制水土流失和氮磷流失为主要防控策略, 强化径流的集蓄和梯级再利用。

2) 分区协同防控。通过促进各分区间的水和污染物的流动, 建立流域农业面源污染物分区协同防控机制。林地作为水源涵养区, 一方面可为村庄提供生活用水, 另一方面林地所产清水流经村庄与污水混合后会带来污水量大、处理难等问题, 应在清水入村前进行分流调控, 一部分供应村庄用水, 其余通过清水通道直接入湖/河; 坡耕地单位面积 TN 和 TP 污染负荷仅为村庄的 7.58%和 1.79%, 可以通过坡耕地就近就地消纳村庄粪便污水, 协同实现畜禽养殖粪便污染治理与资源化利用, 既可以节约水肥, 还可以降低粪污处理成本。

3) 重点防控关键源和关键期。由于不同土地利用类

型氮磷浓度在时间上存在异质性(图 2),在汛期,应重点管控坡耕地水土与氮磷流失,不仅要防止氮磷肥的过量施用,还要通过集水池或生态塘等对汛期的径流进行拦蓄再利用。在非汛期,应重点管控村庄中畜禽养殖粪污污染(畜禽养殖源 TN 和 TP 污染负荷比例分别占流域的 45.69%和 71.77%),粪污贮存和处理设施的设计容积应充分考虑粪污产生与利用的错期问题。

3 讨 论

3.1 时间变化对水质的影响

研究发现,2015—2020 年研究区村庄水质呈不断恶化趋势,TN 和 TP 平均浓度从 2015 年的 6.01 和 0.22 mg/L 增加到 2020 年的 12.69 和 0.35 mg/L,内梅罗污染指数评价结果表明 2020 年村庄污染程度为重污染,分析其原因主要是由于受近年来市场行情影响,长坪小流域生猪养殖量增加 50%左右。在本研究中,不同土地利用类型氮磷浓度随季节变化差异明显,村庄非汛期氮磷浓度高于汛期,该时期 TN 和 TP 浓度分别比汛期高 57.45%和 63.16%,坡耕地非汛期氮磷浓度均低于汛期,不同土地利用类型氮磷浓度的季节性差异主要是受降雨因素的影响,降雨具有污染和稀释的双重作用^[26],表 3 的分析结果证实,降雨量和村庄氮磷浓度负相关,和坡耕地、林地和水库的氮磷浓度正相关。Xu 等^[27]的研究也表明,村庄排放污水氮磷浓度在汛期因雨水稀释浓度降低,农田汛期氮磷浓度高于非汛期。

3.2 土地利用对水质的影响

土地利用类型是影响流域径流产生、土壤侵蚀和氮磷输出负荷的重要因素^[28],研究发现,流域内氮磷输出浓度从高到低依次为村庄、坡耕地、林地、水库,这与已有的研究结果相似^[4]。本研究结果表明村庄和坡耕地对流域水质起负向作用,林地和水库对流域水质起正向作用,这与范雅双等^[29]的研究结果相同。村庄靠近河道,且村庄的不透水表面的面积较高,道路、屋顶等使污染物更容易汇聚,生活污水和畜禽养殖粪便等直接排放致使大量氮磷污染物进入河道,对河道造成负担^[30]。坡耕地受水土流失以及农业活动等因素的影响,向河道输入大量氮磷营养物,同时也作为植被或湿地系统吸附,消纳污染物,对进入河道的污染物有截留作用^[31]。林地植被覆盖度高,根系发达,可以有效拦截污染物,减少氮磷的输出。水库具有较强的自我净化能力,受人类活动的影响较小,氮磷浓度保持低水平,水库出水能降低流域河道氮磷浓度。

3.3 流域氮磷输出负荷的影响因素

在本研究区中,畜禽养殖源是长坪小流域最主要的氮磷污染源,其 TN 和 TP 的输出负荷分别占流域 TN 和 TP 输出负荷的 45.69%和 71.77%。张维理等^[32]的研究发现即使少量的畜禽养殖废水进入水体,也容易使水体富营养化。李荣刚等^[33]对太湖地区水体污染物排放量的研究表明,畜禽养殖排放的 TP 占水体总量的 86.4%。连慧妹等^[34]的研究也表明,畜禽养殖源产生的 TP 占全流域 TP 产生量的 77.24%。在本研究中,农村生活源 TN 和 TP

的输出量虽然仅占全流域的 15.30%和 9.18%,但由于村庄距河道位置较近,污水在河道汇合处会引起氮磷浓度的升高,使得河道的局部污染严重。种植业源也是小流域重要的污染源,TN 输出负荷占流域 TN 输出负荷总量的 25.67%,长坪小流域坡耕地基本采用顺坡种植,在 6—7 月氮磷流失风险期,作物处于苗期,地表裸露大,水土流失风险大。因此,减少村庄和坡耕地的氮磷污染负荷输出,是长坪小流域农业面源污染防控的关键。

3.4 流域农业面源污染分区协同防控策略

《关于加快推进长江经济带农业面源污染治理的指导意见》中指出要统筹推进种植业、养殖业和农村生活污染防治,系统设计治理方案。因此,需要改变按单个污染源治理的传统模式,本文从流域面源污染治理角度,基于流域内土地利用类型、污染特征及功能进行防控分区,将流域分为林草水源涵养区、村庄污染控制区和坡耕地水土保持区,依据不同分区的保护与治理需求,实施差别化的管理与协同防控策略。以流域为单元,统筹考虑种植业、畜禽养殖业和农村生活污染排放特征,明确污染治理重点和关键期,注重各分区间水和污染物的紧密衔接,以最低成本实现最佳治理效果。

氮磷对于水体是污染物,但是对于作物是生长发育必需的营养物质。对于农业生态系统来说,最好的农业面源污染治理方式是将各个污染源中的氮磷通过土地消纳,变废为宝,实现双赢。分散养殖的畜禽粪污经过无害化处理后就近就地施用于庭院周边的坡耕地、果园、菜地中比较经济可行,既促进粪肥利用,又可减少污染排放,实现生产、生活清洁化。在三峡库区小流域,由于沟道短,水流急,导致流域自净能力差,除了考虑土地利用类型外,还应根据流域实际情况,在坡耕地与消落带或水体交汇处建立临水生态净化区,通过生态沟、塘、植被过滤带或消落带等净化后再排入水体,对坡耕地径流中的泥沙、氮磷和农药等污染物进行有效截留^[35-36],提升流域自净能力。

4 结 论

1) 不同土地利用类型氮磷输出浓度具有较强空间异质性,氮磷输出浓度从高到低依次为村庄、坡耕地、林地、水库;流域氮磷输出浓度的季节变化存在显著差异,村庄氮磷输出浓度为非汛期高于汛期,坡耕地、林地和水库则表现为汛期高于非汛期;畜禽养殖源是该流域最主要的氮磷污染源,TN 和 TP 的输出负荷占比分别为流域总负荷的 45.69%和 71.77%,对畜禽养殖污染进行合理控制,可有效提高小流域水质;坡耕地与村庄相比具有显著的低污染特征,小流域坡耕地的 TN 和 TP 单位面积污染负荷分别是村庄的 7.58%和 1.79%,因此,可以以坡耕地消纳村庄污水和畜禽粪便。

2) 根据流域内不同土地利用类型的水质时空变化特征,可将流域分为林草水源涵养区、村庄污染控制区和坡耕地水土保持区,建立分区协同防控策略,促进各分区间的水和污染物的流动,对关键污染源和关键时期进行重点防控,进而实现对流域农业面源污染的低成本和高效治理。

[参 考 文 献]

- [1] Chen C, Gao M, Xie D, et al. Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges Region[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2016, 188(4): 257.
- [2] Francisco J D, Anthony T, Dahlgren R A. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 171-183.
- [3] Wu J, Zeng S, Yang L, et al. Spatiotemporal characteristics of the water quality and its multiscale relationship with land use in the Yangtze river basin[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3309.
- [4] 闵惠琳, 宋维峰. 全福庄小流域不同土地利用类型地表水氮浓度动态特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 92-97.
Min Huilin, Song Weifeng. Dynamic characterization of surface water nitrogen concentration under various land uses in Quanfuzhuang watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 92-97. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王晓燕, 王一岫, 王晓峰, 等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 30-33.
Wang Xiaoyan, Wang Yixun, Wang Xiaofeng, et al. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun reservoir[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 30-33. (in Chinese with English abstract)
- [6] 纪仁婧, 洪大林, 和玉璞, 等. 南方低山丘陵区小流域不同土地利用方式下面源污染分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 181-185.
Ji Renjing, Hong Dalin, He Yupu, et al. Non-point source pollution distribution characteristics under different landuses in small watershed in the hilly regions of south China[J]. Journal of Water resources & Water Engineering, 2020, 31(4): 181-185. (in Chinese with English abstract)
- [7] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1008-1019.
Xu Qiyu, Wang Peng, Wang Tao, et al. Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang river, Lake Poyang Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 1008-1019. (in Chinese with English abstract)
- [8] 彭勃, 付永胜, 赵君凤, 等. 小流域土地利用景观格局对水质的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 90-99.
Peng Bo, Fu Yongsheng, Zhao Junfeng, et al. Effect of land use landscape pattern on water quality in small watershed[J]. Ecological Science, 2019, 38(3): 90-99. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2940-2946.
- [10] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 138-146.
Hua Lingling, Li Wenchao, Zhai Limei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu river small watershed of the Three Georges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 138-146. (in Chinese with English abstract)
- [11] 梁爽, 陈敏, 肖尚斌, 等. 鄂西长江喀斯特小流域氮磷输出特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(10): 2471-2481.
Liang Shuang, Chen Min, Xiao Shangbin, et al. Nitrogen and phosphorus output in a small karst basin of the Yangtze River in western Hubei[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(10): 2471-2481. (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang T, Xiao W, Huang Z, et al. Interflow pattern govern nitrogen loss from tea orchard slopes in response to rainfall pattern in Three Gorges Reservoir Area[J]. Agricultural Water Management, 2022, 269: 107684.
- [13] Zhang T, Ni J, Xie D. Severe situation of rural nonpoint source pollution and efficient utilization of agricultural wastes in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(21): 16453.
- [14] 郭萍, 夏振尧, 高峰, 等. 香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 105-112.
Guo Ping, Xia Zhenyao, Gao Feng, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhang Y, Xie D, Ni J, et al. Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir Area: No-till is better than mulch-till[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 300: 107003.
- [16] 杨桂山. 流域综合管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 王文静, 高鹏程, 李捷, 等. 丹江口水库典型入库支流水质评价与趋势分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 127-130.
Wang Wenjing, Gao Pengcheng, Li Jie, et al. Water quality assessment and trend analysis of typical tributaries of Danjiangkou reservoir[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 127-130. (in Chinese with English abstract)
- [18] Nemerow N. Scientific Stream Pollution Analysis[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [19] 潘苹, 黄晓荣, 魏晓玥, 等. 三种常用水质评价方法的对比分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 51-55.
Pan Luo, Huang Xiaorong, Wei Xiaoyue, et al. A

- comparative analysis of three common water quality evaluation methods[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(6): 51-55. (in Chinese with English abstract)
- [20] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11: 269-286.
- [21] 龚世飞, 丁武汉, 居学海, 等. 典型农业小流域面源污染源解析与控制策略: 以丹江口水源涵养区为例[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3919-3931.
- Gong Shifei, Ding Wuhan, Ju Xuehai, et al. Source analysis and control strategies of non-point source pollution in typical agricultural small watershed: A case study of Danjiangkou water conservation area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3919-3931. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王萌, 刘云, 李春蕾, 等. 三峡库区湖北段非点源污染氮磷排放时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 46-52.
- Wang Meng, Liu Yun, Li Chunlei, et al. Spatio-temporal distribution of pollution loads from agricultural non-point sources nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir Area of Hubei province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 46-52. (in Chinese with English abstract)
- [23] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [24] 任天志. 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.
- [25] 刘佳昆. 基于改进输出系数模型的澎溪河流域非点源污染研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Liu Jiakun. An Improved Export Coefficient Model to Estimate Nitrogen and Phosphorus Loads in Pengxi River Basin, Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [26] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. *地球与环境*, 2018, 46(4): 364-372.
- Tang Lian, Hu Xiaohui, Quan Guanzhong, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of water quality in Tanjiang River Basin and its correlation with land use[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(4): 364-372. (in Chinese with English abstract)
- [27] Xu J, Jin G, Tang H, et al. Response of water quality to land use and sewage outfalls in different seasons[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134014.
- [28] Chen X, Xu G, Zhang W, et al. Spatial variation pattern analysis of hydrologic processes and water quality in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2608.
- [29] 范雅双, 于婉晴, 张婧, 等. 太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系: 以东苕溪上游为例[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1478-1489.
- Fan Yashuang, Yu Wanqing, Zhang Jing, et al. Response of water quality to landscape pattern change in the water source area of upper reaches of Lake Taihu: A case study in the upper reaches of Dongtiaoxi River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(5): 1478-1489. (in Chinese with English abstract)
- [30] Asnake K, Worku H, Argaw M. Assessing the impact of watershed land use on Kebena river water quality in Addis Ababa, Ethiopia[J]. *Environmental Systems Research*, 2021, 10(1): 1-14.
- [31] Kadir A, Ahmed Z, Uddin M M, et al. Integrated approach to quantify the impact of land use and land cover changes on water quality of Surma river, Sylhet, Bangladesh [J]. *Water*, 2022, 14(1): 17.
- [32] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- Zhang Weili, Wu Shuxia, Ji Hongjie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李荣刚, 夏源陵. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(2): 147-153.
- Li Ronggang, Xia Yuanling. Water pollutants and their discharges to water bodies in Taihu lake, Jiangsu province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(2): 147-153. (in Chinese with English abstract)
- [34] 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 等. 太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析[J]. *环境科学*, 2017, 38(9): 3657-3665.
- Lian Huishu, Liu Hongbin, Li Xudong, et al. Analysis of spatial variability of water quality and pollution sources in Lihe river watershed, Taihu lake basin[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3657-3665. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张维, 孙虹蕾, 唐翔宇. 三峡水库消落带土壤胶体释放与迁移特[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 188-194.
- Zhang Wei, Sun Honglei, Tang Xiangyu. Soil colloid release and transport in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(1): 188-194. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李姗泽, 邓玥, 施凤宁, 等. 水库消落带研究进展[J]. *湿地科学*, 2019, 17(6): 689-696.
- Li Shanze, Deng Yue, Shi Fengning, et al. Research progress on reservoir subsidence zone[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(6): 689-696. (in Chinese with English abstract)

Spatio-temporal characteristics of water quality and pollution prevention strategies in typical watersheds in the Three Gorges reservoir areas

Li Ganghao^{1,2}, Fan Xianpeng¹, Xia Ying^{1*}, Liu Hongbin³, Wu Maoqian¹, Zhang Fulin¹,
Huang Min², Zhai Limei³, Zhou Jiwen⁴, Kong Xiangqiong⁴, Cheng Zizhen¹

(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences/National Station for Qianjiang Agro-Environment/Hubei Engineering Technology Research Center of Agricultural Non-Point Source Pollution Control, Wuhan 430064, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Xingshan County Agriculture and Rural Bureau, Xingshan 443700, China)

Abstract: Water quality has been greatly confined to the nitrogen loss and phosphorus pollutants caused by agricultural production in the Three Gorges Reservoir Area. This study aims to clarify the characteristics of water quality under different land use types in typical small watersheds. The water quality monitoring was conducted in the Changping small watershed in the Three Gorges Reservoir Area from 2015 to 2020. A systematic investigation was made on the change patterns of Total Nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3^- -N), ammonia nitrogen (NH_4^+ -N), Total Phosphorus (TP), Dissolved Total Phosphorus (DTP), and Total Particulate Phosphorus (PP) concentrations in the water bodies under land use types, together with their influencing factors. The results showed that: 1) The overall nitrogen and phosphorus output concentrations of land use types were ranked in the order of the village > sloping farmland > forest land > reservoir. The average TN concentrations were 8.29, 2.88, 1.57, and 1.43 mg/L in the villages, sloping farmland, forest land, and reservoirs, respectively. The average TP concentrations were 0.25, 0.13, 0.09, and 0.07 mg/L, respectively. 2) There was a different water quality of land use types during the flood and non-flood periods. The concentration of nitrogen and phosphorus output in the villages was higher in the non-flood period than that in the flood period. The sloping farmland, forest land, and reservoirs showed a higher concentration in the flood period than those in the non-flood period. 3) The Nemerow comprehensive pollution index demonstrated that the pollution level of both forest land and reservoir was at the clean level, and the sloping farmland was at the light pollution level. But, the pollution level of the village deteriorated from the pollution level to a heavy pollution level, due to the increase in pig farming. 4) The annual output loads of TN and TP in the Changping sub-basin were 4 278.59 and 364.93 kg/a, respectively. Livestock and poultry breeding was the most important source of nitrogen and phosphorus pollution in the sub-basin, with the output loads of TN and TP accounting for 45.69% and 71.77%, respectively. The TN and TP pollution load per unit area of sloping land in the sub-basin were 7.58% and 1.79% of those of village, respectively. The sloping farmland presented significantly low pollution characteristics, compared with the village. Therefore, the sloping farmland can be used to absorb the village sewage and livestock manure, in order to promote the local absorption of manure in the basin for the better effect of multi-source co-management. The land use structure of the whole watershed can also be adjusted in an effective way to control agricultural surface pollution. Therefore, the small watershed was divided into the forest and grass water connotation zone, village pollution control zone, as well as sloping farmland soil and water conservation zone, according to the water quality and ecosystem service function of land use types. Zoning collaborative prevention and control strategy should be an effective way of promoting the water resource, nitrogen and phosphorus transfer from one pollution control zone to another pollution control zone in order to preventing the pollutants export to the out of the small watershed. The finding can provide the theoretical basis and technical support for the control of nitrogen and phosphorus pollution in the protection of water sources in the Three Gorges Reservoir Area.

Keywords: water quality; land use; spatial distribution; Three Gorges Reservoir Area; typical watershed; agricultural non-point source pollution; zoning collaborative prevention and control strategy