

DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2025.53.024

CSTR: 32253.14.EE.1672-9250.2025.53.024

2003—2022年衢州市人类活动净磷输入(NAPI)的时空动态变化

杨雨航¹, 韩玉国^{1,2,3,*}, 张小林⁴

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 3. 山西省吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200; 4. 衢州市乌溪江饮用水水源保护管理中心, 浙江 衢州 324003)

摘要: 衢江流域是衢州市和浙江省重要用水来源。随着人类活动加剧, 衢州市磷循环过程受到显著扰动, 磷污染事件时有发生。为推进衢州市磷污染的治理, 基于人类活动净磷输入模型(NAPI)估算了衢州市2003—2022年净磷输入量, 分析了NAPI时空特征、组分变化原因及影响因素。结果表明: 衢州市NAPI 20a的平均值为2 204 kg/(km²·a), 时间变化呈现出先增加后降低的趋势, 峰值出现在2012年, 达到2 983 kg/(km²·a)。衢州市各子单元空间表现出一定差异性, NAPI的平均值空间分布呈现出东高西低的分布, 与土地利用状况分布接近, 与河流TP含量相关性显著($P=0.018<0.05$), NAPI的各组分平均占比表现为人类食物动物饲料磷输入约占58%~75%, 肥料磷输入约占19%~33%, 非食物性磷约占7%~11%, 从2003—2022年NAPI的变化主要受人类食物动物饲料磷输入影响, 肥料磷输入次之, 非食物性磷影响相对较小。因此, 为减少NAPI, 主要采取措施: 适当减少农田中磷肥的使用, 逐步使施肥规范向国际发达国家农业标准看齐; 结合衢州当地人口的实际需要, 合理调整畜禽养殖数量; 全面推动无磷洗涤剂的应用。采取以上措施后预计可使NAPI依次下降约180、247、60 kg/(km²·a), 合计下降约487 kg/(km²·a), 降至全国较低水平。

关键词: 人类活动净磷输入(NAPI); 衢江流域; 时空变化特征; 削减策略

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2026)01-0033-12

衢江流域是浙江省水资源战略安全的重要保障区域之一, 为衢州及钱塘江下游地区提供了关键的生产与生活用水。衢州市生态红线保护面积近2 500 km², 位居全省第三。保护衢江流域水源, 对保障居民饮水安全及区域生态环境安全具有重大意义。随着人类活动影响不断加深, 本区域的磷循环过程受到明显干扰^[1], 已出现局部磷污染问题, 尤其在畜牧、水产和种植等行业快速发展的背景下, 引发了藻华及蓝藻频繁发生等现象^[2], 加剧了水域富营养化风险。因此, 加强磷污染治理对流域生态保护及预防水体富营养化十分关键。

定量分析人类活动导致的磷输出通量变化及其来源构成, 是有效管控磷污染的重要科学依据^[3]。当前, 在面源磷污染负荷研究中, 国内外普遍运用模型模拟的方式进行测算, 而对关键污染区域的判别, 则多依赖于基于模型的定量评价方法。2008年Russell等^[4]在Howarth等^[5]建立的人类活动净氮输入模型(NANI)的基

础上, 进一步提出了人类活动净磷输入模型(NAPI)。自NAPI模型被提出, 被广泛应用于国内国外的很多地区和流域, 例如伊利湖流域^[6]、波罗的海^[7]和加州中央谷地^[8]等。在国内也相继有学者将该方法运用于各个地区和流域^[9]等; 陈丽娜等^[10]基于SWAT模型构建田—沟—塘—控制断面的面源污染全过程数值模拟模型; 岳帅均等^[11]基于InVEST模型测算了京津冀地区历史时期2000—2020年和未来时期2030—2050年的氮素污染时空变化情况。不同模型因其各自特点, 在结果输出上会存在差别。NAPI模式主要基于经济社会的统计数据, 较为综合地包括了人类活动主要净磷输入成分。计算所得结果, 能够系统反映人类活动对磷循环的影响。其计算结果有助于识别关键磷污染源, 评估环境压力, 并为区域磷管理和水质保护提供科学依据。

本研究借助衢州市2003—2022年期间各类磷源的输入数据, 计算了这一时期内NAPI及其各构成部分的

收稿日期: 2024-09-04; 改回日期: 2025-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303004-4); 乌溪江库区社会发展对生态环境影响调查研究(ZJCCG2023-43)。

第一作者简介: 杨雨航(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域非点源污染治理。email: yangyuhang0725@163.com。

*通信作者: 韩玉国(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域面源污染治理研究。email: yghan@bjfu.edu.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

年际变化情况,分析了组分变化的原因和相关影响因素,阐述了区域水质的变化历程,明确了不同磷源对NAPI的贡献占比,并针对如何削减NAPI给出了具体举措。上述研究成果,为衢州识别磷污染来源、宏观管控人为磷输入以及制定磷污染治理方案提供了重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浙江省衢州市地处本省西部北纬 $28^{\circ}14' \sim 29^{\circ}30'$,东经 $118^{\circ}01' \sim 119^{\circ}20'$,全年平均温度在 $16.3 \sim 17.4^{\circ}\text{C}$,属于亚热带季风气候。全市总面积 $8\,844\text{ km}^2$,下辖柯城区、衢江区、龙游县、常山县、开化县及江山市,共划分为6个研究单元(以行政区划为界),如图1a所示。全域跨越江山—绍兴深断裂,大地构造分属扬子准地台与华南褶皱系两大部分,地质条件复杂,构造类型丰富。到2022年底,全市常住人口为229万人,其中农业人口93.25万,占40.7%。土地利用状况见图1b,森林覆盖面积约 $6\,205\text{ km}^2$,覆盖率达70.16%,农用地面积约为 $2\,089\text{ km}^2$ 。

1.2 NAPI的计算

Russell等^[4]参考Howarth等^[5]的NAPI核算机制,提出构建大尺度下磷估算的方法,指出NAPI主要包含肥料磷输入、人类食物动物饲料磷输入和非食物磷输入。将每部分单独计算并加起来获得NAPI。本研究以衢州市6个单元作为研究对象,计算得到衢州2003—2022年间人类活动净磷输入量。文中NAPI计算各项参数参照

了Hong等^[7]提出的方法,如式(1)所示。

$$\text{NAPI} = P_{\text{fer}} + P_{\text{im}} + P_{\text{nf}} \quad (1)$$

式中: P_{fer} 表示肥料磷输入; P_{im} 表示人类食物动物饲料磷输入; P_{nf} 表示非食物磷输入。

1.2.1 肥料磷输入

研究区肥料磷输入主要源于磷肥和复合肥,统计年鉴中磷肥的折纯量以五氧化二磷(P_2O_5)表示,每种含磷肥料,根据施用量和分子量折纯为磷的质量,根据每吨 P_2O_5 含磷436.4 kg的分子量进行计算,本研究根据当地农业局经常采购的复合肥种类本项研究依据当地农业局常用复合肥种类的平均成分,得出其磷含量约为12.5%。该项输入的计算方法为:磷肥施用总量=纯磷肥施用量 $\times 100\%$ +复合肥施用量 $\times 12.5\%$ 。

1.2.2 人类食物动物饲料磷输入

本研究采用Jordan等^[12]的方法进行计算,由区域内人类和畜禽的磷消费量与磷素产品含量的差值获得,数据主要来自衢州市统计年鉴,该值的计算公式(2)所示。

$$P = P_{\text{hc}} + P_{\text{lc}} - P_{\text{lp}} - P_{\text{cp}} \quad (2)$$

式中: P_{hc} 代表人类食物磷输入量; P_{lc} 代表畜牧饲料磷输入量; P_{lp} 代表畜产品磷产量; P_{cp} 代表作物磷产量。

1) 人类食物和动物饲料磷消费量

假设人体不积存磷元素(即体内仅存在磷代谢过程),经由食物摄入的磷最终将全部排出体外。参照武淑霞^[13]的研究,我国每年人均从食物中摄入的磷约为0.52 kg,本文结合该地区常住人口数量与这一人均数值,推算出人类食物磷消费量。畜禽饲料磷消费量是在

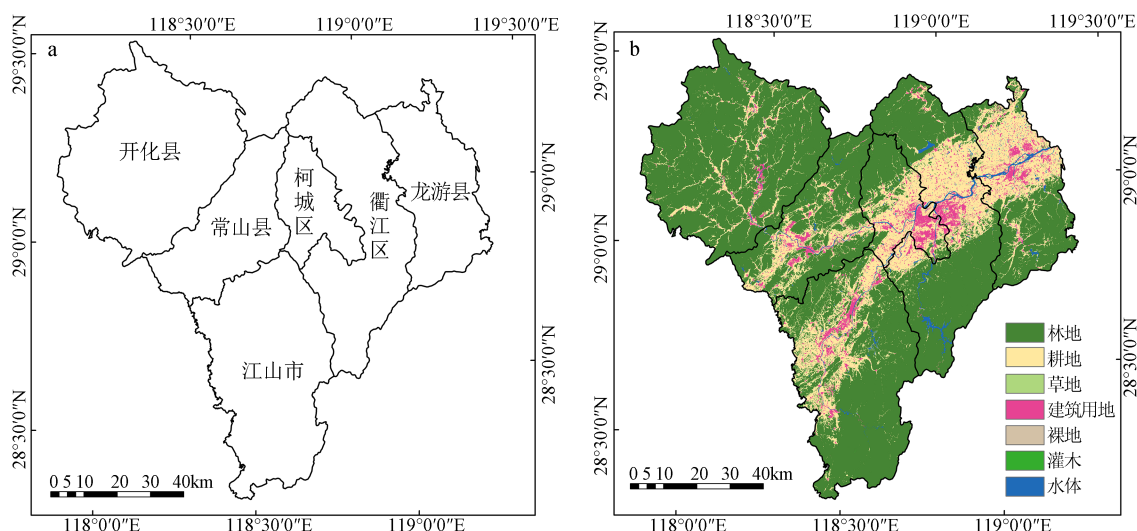


图1 衢州市行政区域分布及土地利用

Fig. 1 Administrative distribution and land use of Quzhou City

养殖过程中所摄入的磷,等于其个体排泄物与自身增重两部分所含磷的总和。基于统计年鉴数据汇总了5种主要养殖动物的磷消耗量见表1。

2) 作物磷产量

本研究选取了14种衢州具有代表性的农作物作为磷来源的计算基础,数据来源于《中国食品成分表》第一册^[15],这些作物全面反映了衢州地区农作物种植现状。不同作物的含磷量与作物产量相乘得出作物磷产量,相关数据均来自衢州市统计局,具体各作物类型的含磷量详见表1。

表1 NAPI估算的相关参数值及来源

Table 1 Relevant values and sources for parameters in estimating NAPI

计算参数		参数值	文献来源
人为磷消耗量/[kg/(人·a)]		0.52	[13]
畜禽磷消耗量/[kg/(头·a)]	猪	4.59	[14]
	牛	10.99	
	鸡	0.18	
	鸭	0.34	
	羊	1.26	
主要农作物含磷量/(g/kg)	大豆	4.65	[15]
	大麦	3.81	
	稻谷	2.05	
	柑桔	0.30	
	梨头	0.06	
	枇杷	0.13	
	其他豆类	4.18	
	蔬菜	0.37	
	薯类	0.49	
	桃子	0.12	
	西瓜	0.20	
	小麦	3.25	
	杨梅	0.09	
动物产品含磷量/(g/kg)	玉米	2.54	[15]
	猪肉	0.97	
	牛肉	1.82	
	羊肉	1.61	
	禽肉	2.22	
	禽蛋	1.78	
	牛奶	0.90	

3) 动物产品磷产量

动物产品通常涵盖肉类、蛋类、奶类和水产品等,数据来源于《中国食品成分表》第二册^[15],动物产品磷产量等于各类动物产品的含磷量与其相应产量的乘积,本研究共涉及6种动物产品。Van^[14]研究表明,在食物加工、处理、运输等环节中会出现一定比例的损耗,该部分按10%进行估算。

1.2.3 非食物性磷

非食物性磷输入,大部分源自日常生活中使用的各类含磷洗涤产品。根据前人研究成果^[16],可知每人消耗非食物性磷为0.63 kg/a。

1.3 数据来源

本研究土地利用数据源于武汉大学Yang等^[17]的2002—2022年30 m分辨率数据,统计数据来源于《衢州统计年鉴》2003—2023年的数据,水质监测数据则通过浙江省政府数据开放平台(<https://zjysqgk.zj.gov.cn/ysqgkqt/ysqgk/front/showzdqh.do>)申请公开得到衢州市各监测点位的2003—2022年的数据。

2 结果与分析

2.1 NAPI时空分布

2.1.1 NAPI时间分布

区域内NAPI时间变化如图2所示,2003—2022年间衢州人类活动磷输入变化规律显著,表现出先上升后下降的趋势,区域内NAPI在2012年达到峰值为2 982.79 kg/(km²·a),与2003年相比增幅为63%,多年平均值为2 204.46 kg/(km²·a),其中2018年NAPI值1 832.86 kg/(km²·a)与2003年的NAPI的值1 825.52 kg/(km²·a)基本持平,并且在2018之后逐渐降低,并且低于2003年的值。

如图2所示,各个区县的年际变化都有一定差异,可以看出NAPI变化较大的区域有龙游县、柯城区、衢江区和江山市4个区域,其中龙游县呈现出增加的趋势后持平,柯城区、衢江区与江山市这3个研究单元的变化趋势均表现为先上升后下降;常山县和开化县则波动较小,整体较为平稳。柯城区的最大与最小值之差为3 683.12 kg/(km²·a),衢江区相差3 424.05 kg/(km²·a),龙游县相差3 206.35 kg/(km²·a)。江山市相差1 741.42 kg/(km²·a),从中可以看出,柯城区变化最大,其NAPI的值也是减少的最多的,说明柯城区作为市中心,在有意减少有关磷输入的人类活动,防止磷输入过多引起的环境问题等。

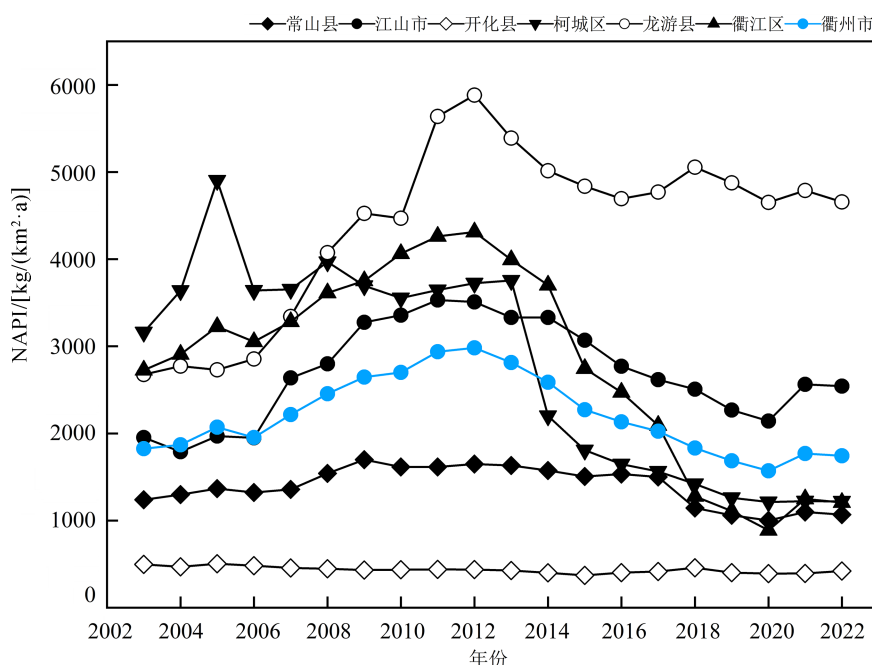


图2 衢州不同年份NAPI

Fig. 2 NAPI in different years in Quzhou and each administrative unit

2.1.2 NAPI空间分布

图3展示了2003—2022年间衢州各研究单元NAPI空间分布。从多年平均结果来看,龙游县的NAPI处于较高水平,其次是衢江区、柯城区和江山市。整体上,全市NAPI呈现自西向东递增的趋势,东部数值普遍高于西部。结合土地利用类型分析可知,开化县的森林覆盖水平显著高于其他地区,该区域的NAPI数值也处于较低水平;农业用地呈现出自西向东逐渐增多的趋势。而在人口较为集中、畜牧业发展更为充分、磷肥施用量更高的东部地带,如农业用地占比较高的龙游县,其NAPI也相应较高。

从每年的空间分布图来看,在整个20年时间尺度的前期,人类活动净磷输入以柯城区为中心向周围辐射降低的特点,其他区域表现出西低东高的特点。随时间推移,磷输入较高的区域逐渐从衢州市中心的柯城区向东部龙游县一带转移。在2012年前后,整个区域的NAPI值达到峰值,各个区域的NAPI值都比较大,之后每个区域的NAPI值都在降低。可以看出2012年以前的NAPI分布区域比2012年以后NAPI的分布区域广且NAPI的值更大;自2012年以后,龙游县的NAPI值持续保持最高水平,磷输入量也维持在较高水平。到2022年,除龙游县和江山市外,其他5个区域的磷输入量均保持在 $2\,800\text{ kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以下。

衢州的NAPI空间分布也与区域土地利用类型相

似,衢州西部多为丘陵低山,植被茂密,农业与工业发展规模较小,因此NAPI值较低。中部地区主要为河谷平原与丘陵相间分布,东部则以平坦的河谷平原为主,地势开阔,农业工业更为集中,人口较为稠密,因此NAPI值较高。已有研究^[9]同样指出,区域土地利用类型对NAPI的空间分异具有重要影响。

2.2 NAPI组成及其变化分析

本研究对衢州市全域及各区县NAPI的组分进行分析(图4)。结果显示,人类食物动物饲料磷输入及肥料磷输入所占比例最高,分别介于 $57.80\%\sim 75.41\%$ 和 $18.55\%\sim 32.85\%$,年平均贡献量分别为 $1\,507.55\text{ kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 与 $517.02\text{ kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,各占衢州近20a平均NAPI值的 67.59% 和 23.93% 。其次为非食物性磷输入,其贡献比例相对稳定,大致在 $6.85\%\sim 10.77\%$ 范围内,年均贡献量为 $179.87\text{ kg}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,约占衢州NAPI 20a均值的 8.15% 。由此可见,人类食物动物饲料磷输入是影响该地区NAPI值的主要因素。

可以看出整个区域主导因素为人类食物动物饲料磷输入,呈现出先增加后减少的趋势,与NAPI总值的变化趋势相似,Mao等^[18]的研究同样也表现出人类食物动物饲料磷输入占比更大。

从图5可以看出,2003—2022年衢州各区县各组分变化情况。整体来看,江山市与开化县的各项组分未出现显著波动,肥料磷输入呈逐年下降趋势,而人类食物

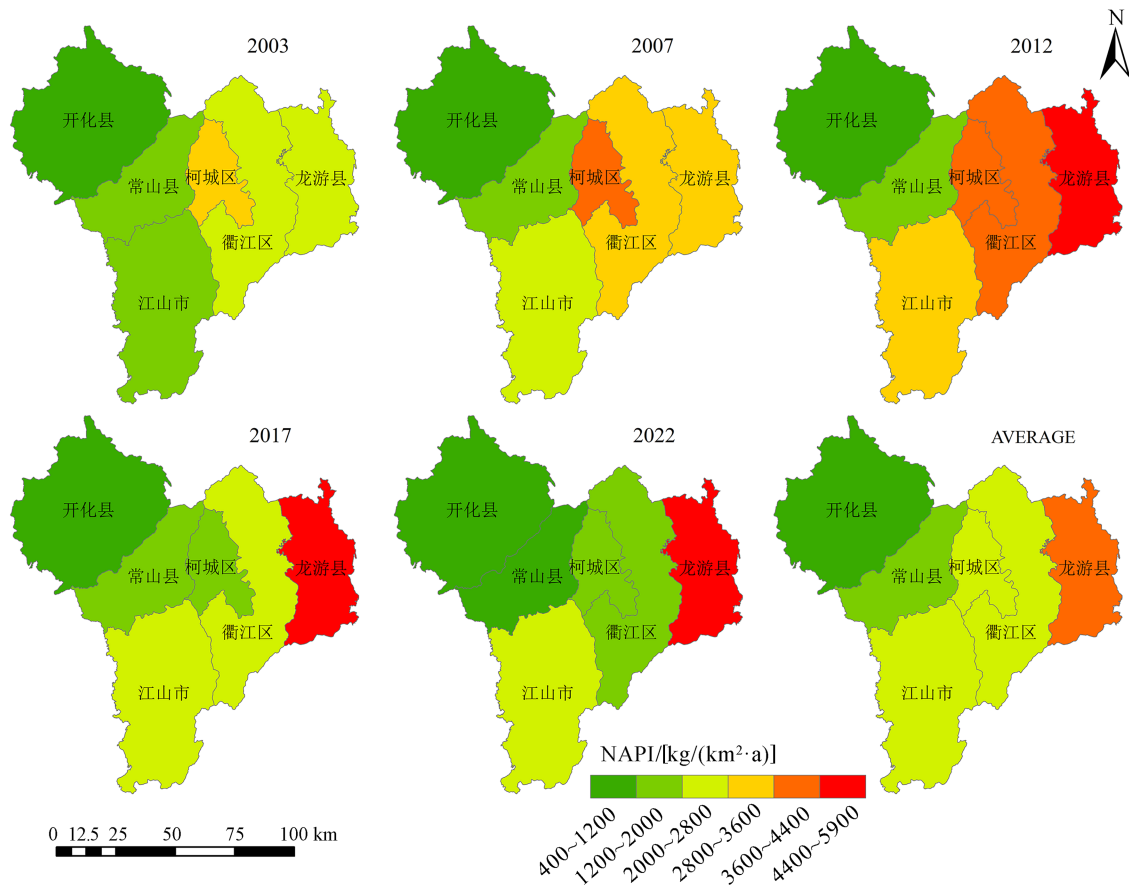


图3 衢州NAPI空间分布图

Fig. 3 NAPI spatial distribution map in Quzhou

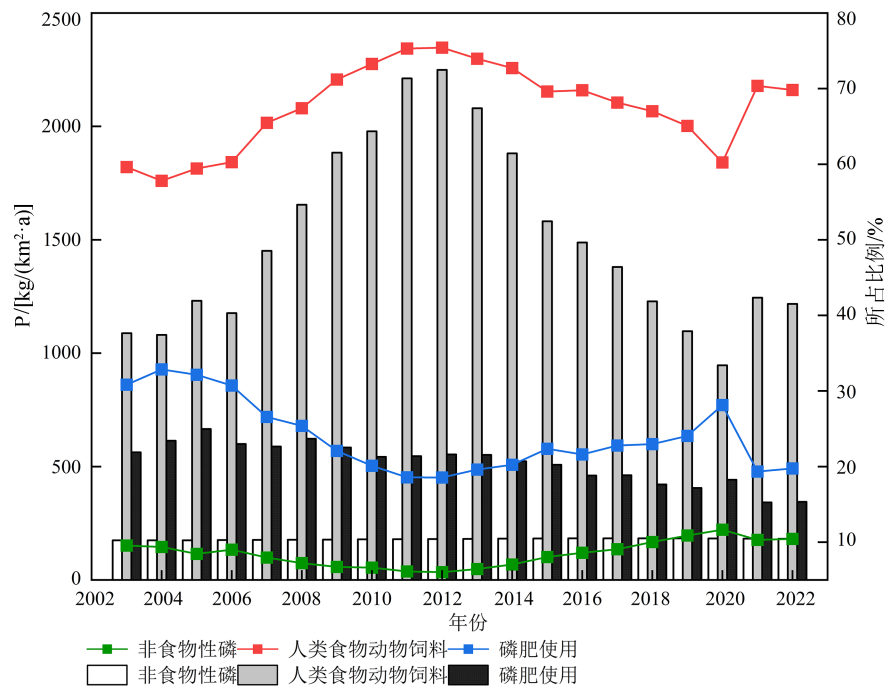


图4 衢州市NAPI组分分析

Fig. 4 Sources of NAPI in different years in Quzhou

动物饲料磷输入则缓慢上升。在这之中,开化县的三个组成部分占比相对平均,该县森林覆盖较广、产业发育程度不高,影响NAPI的各项因素未出现某一项特别显著的情况。江山市的人类食物动物饲料磷输入占比明显较高。其中柯城区和衢江区2个区的NAPI组成呈现独特变化。这2个地区的人类食物动物饲料磷输入出现显著变化,人口呈稳定增长,但增长率较小分别为2.99%和6.31%,影响人类食物动物饲料磷输入的关键因素并非人口总量,而更取决于动物所消耗的磷总量。自2012年农业结构发生调整后,畜禽养殖数量明显下

降,致使该部分磷输入呈现先增后减的变化趋势。龙游县的人类食物动物饲料磷输入占比则持续上升,这主要归因于当地畜牧业的不断发展。

常山县和开化县NAPI值总体变化主要是由于肥料磷输入和人类食物动物饲料磷输入共同的变化引起的,2县肥料磷输入分别降低了62%和41%,人类食物动物饲料磷输入有所增加。而影响柯城区、衢江区、常山市和龙游县的因素主要是人类食物动物饲料磷输入,其变化最大且占比大,其次是肥料磷输入的改变,非食物磷输入占比较小。

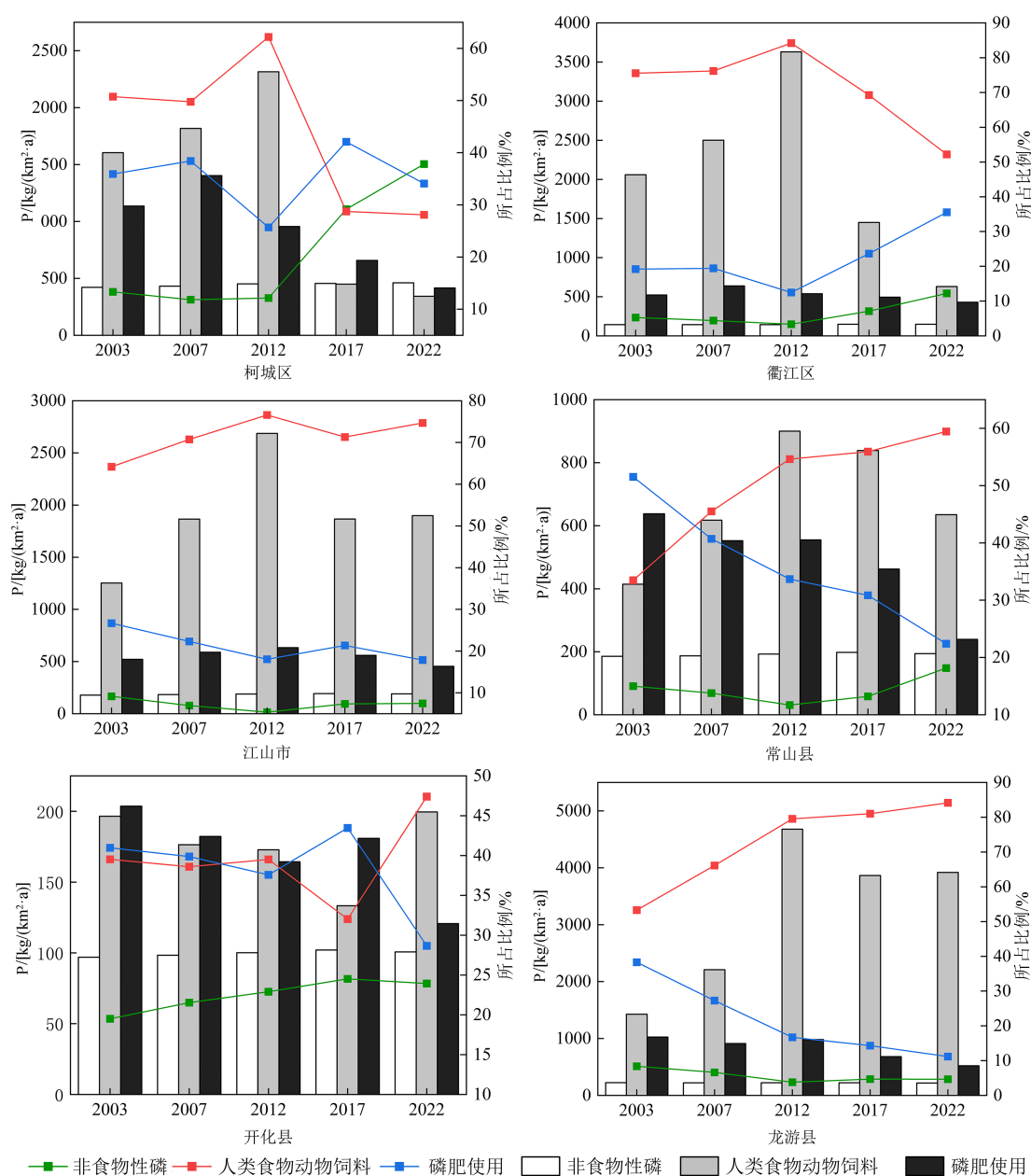


图5 衢州市各区县2003—2022年NAPI组分分析

Fig. 5 NAPI component analysis of each administrative unit in Quzhou City from 2003 to 2022

3 讨论

3.1 NAPI与河流水质总磷含量对比分析

衢州市内地表水监测点及通过克里金插值得出各区域水源2003—2022年总磷含量(图6),从中可以看出,水源总磷含量呈现出西低东高的特点与NAPI 2003—2022年分布图表现的趋势相近,水源TP含量较高的为柯城区、衢江区和龙游县,相对较低的为开化县、常山县和江山市。将NAPI与河流TP含量做相关性分析可得($P=0.018<0.05$)说明其在0.05级别相关性显著。根据历年各区县河流TP含量(表2)可知,各区县均有先增加后降低的趋势,例如常山县、开化县和柯城区的峰值均出现在2012年,分别为0.066、0.036和0.122 mg/L;江山市、龙游县和衢江区的峰值出现在2007年,分别为0.127、0.181和0.135 mg/L,该趋势与各研究单元NAPI变化趋势类似。2022年各区县河流TP含量为龙游县($TP=0.062$)>衢江区($TP=0.050$)>柯城区($TP=0.048$)>常山县($TP=0.040$)>江山市($TP=0.039$)>开化县($TP=0.018$),2022年NAPI变化趋势为龙游县>江山市>衢江区>柯城区>常山县>开化县。可看出NAPI与河流

水含量与实际情况相符。

3.2 Mann-Kendall突变检验

Mann-Kendall(MK)检验属于一类非参数统计方法,其主要用途是分析和判断时间序列数据中是否存在某种趋势性变化。图7a为2003—2022年NAPI的MK突变检验结果,显著水平为0.05,对应阈值为 ± 1.96 。UF统计量和UB统计量有两个交点分别在2019年和2021年左右,说明在这两个年份发生了突变,并且该突变点均发生在置信区间之间,由UF曲线可以看出2007年—2017年超出阈值线,说明其变化显著。图7b为2003—2022年影响因子生猪产量的突变检验,可以看出其2019年前的变化趋势与NAPI变化趋势相近,该因素仅有一个交点在置信区间内,可以看出在2019年发生突变。

3.3 与其他区域NAPI比较

根据相关文献整理结果(表3),汇总了全球部分国家及中国不同区域的NAPI数值。数据表明,国外研究区域的NAPI普遍处于400~900 kg/(km²·a)的范围,而国内地区则通常在1 000~8 000 kg/(km²·a)之间。本研究区衢州市,2003—2022年期间NAPI平均值为2 204 kg/(km²·a),

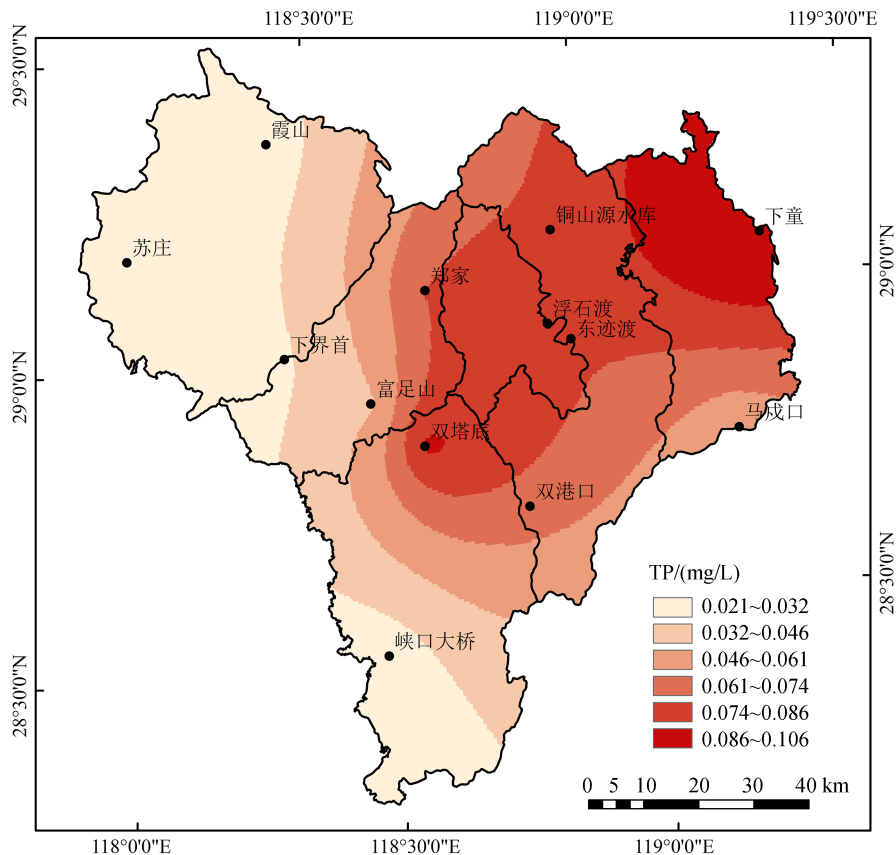


图6 地表水监测站点分布及TP含量分布

Fig. 6 Distribution of surface water monitoring stations and TP levels

表2 各研究单元河流TP平均含量

年份	常山县	江山市	开化县	柯城区	龙游县	衢江区
2003	0.049	0.099	—	0.104	0.092	0.121
2007	0.060	0.127	—	0.094	0.181	0.135
2012	0.066	0.119	0.036	0.122	0.159	0.102
2017	0.039	0.066	0.025	0.088	0.077	0.043
2022	0.040	0.039	0.018	0.048	0.062	0.050

注:数据来源于浙江省政府官网的数据开放平台(<https://zjysqgk.zj.gov.cn/ysqgkqt/ysqgk/front/showzdqh.do>)依申请公开;“—”为无数据。

表3 与其他研究区域NAPI对比

研究区域	年份	NAPI/[kg/(km ² ·a)]
中国大陆平均 ^[9]	2009	465
美国Chesapeake Bay waterways ^[4]	1978—2002	452
美国Lake Erie basins ^[19]	1992	858
珠江三角洲 ^[18]	2016	7 647
鄱阳湖流域 ^[20]	2010	1 699
洞庭湖流域 ^[21]	2015	2 414
成渝经济圈 ^[22]	2011—2019	2 291
河南省 ^[23]	1990—2019	7 573
淮河流域 ^[24]	2003—2010	2 741
饶河流域 ^[25]	2008	1 085
华北平原中部 ^[26]	2005	2 325
本研究	2003—2022	2 204
本研究	2022	1 743

2022年数值为1 743 kg/(km²·a)。与发达国家相比,该区域 NAPI值明显偏高,在国内处于中间水平,仍存在一定降低空间。从2022年衢州市三次产业结构(5:43:5)和2019年成渝地区的产业结构(4:45:51)来看,两者在产业结构上较为相似,NAPI值的多年平均分布也相近。相比之下,2015年河南省(11:48:41)和2016年珠江三角洲地区以广州市为例(1:24:75)的产业结构与衢州市存在较大差异,其NAPI值也相应地存在显著差异。

3.4 NAPI的组成变化的原因

从衢州NAPI的3个组成部分可知,人类食物动物饲料磷输入部分在20年间占比约为58%~75%,表4显示衢州市人口密度相对平稳,而动物饲养量发生了显著变化,并且动物消耗磷量明显高于人类消耗磷量。截至2012年,衢州市生猪出栏量相比2003年增长了98.4%,当地畜牧业较为发达,生猪饲养作为主导产业之一,是导致NAPI上升的重要原因。2012年之后,生猪出栏数量出现大幅回落,到2022年已较2012年减少了74.0%,这一变化主要源于衢州实施的生态保护政策,为维护水源地水质,在部分饮用水库周边区域限制或取消了生猪养殖及网箱水产等生产活动。近几年,随着肥料磷和人类食物动物饲料磷输入的明显下降,NAPI呈现出明显下降趋势。总体来看,NAPI呈现出先增加后降低的变化过程。

肥料磷输入约占19%~33%,是对环境造成影响的主要因素。由表4可知,在过去的20年中,衢州市的耕地面积保持稳定,磷肥使用量减少了约一半,粮食产量仅下降了15%。反映出肥料利用效率得到提升。

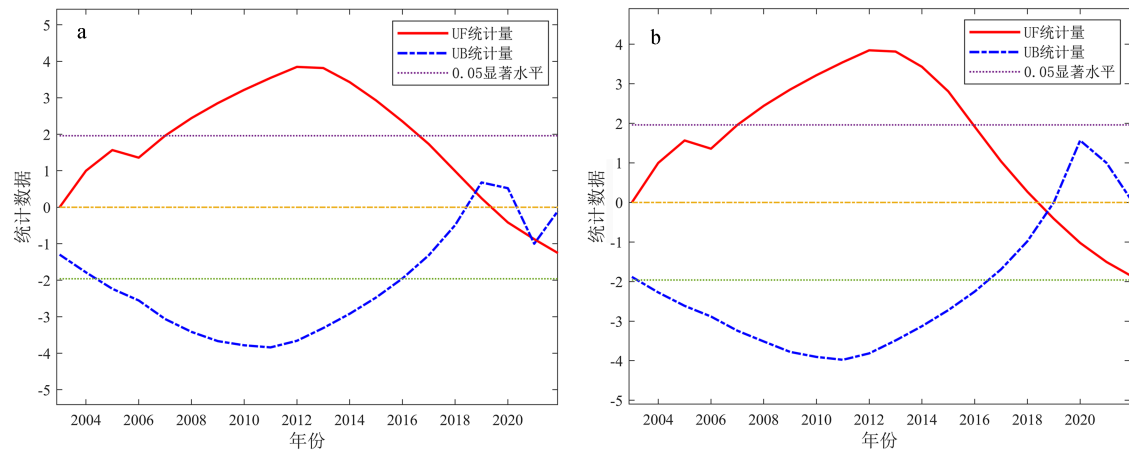


图7 2003—2022年衢州市NAPI(a)及生猪产量(b)MK检验曲线

Fig. 7 MK test curve for NAPI (a) and pig production (b) in Quzhou City from 2003 to 2022

表4 影响组分变化的相关因素

Table 4 Relevant factors affecting changes in components

影响因素	2003年	2007年	2012年	2017年	2022年
耕地面积/km ²	2 023	1 863	1 972	2 085	2 089
磷肥施用量/(t/km ²)	5.64	6.4	5.69	4.48	3.34
粮食总产量/t	655 158	722 216	796 868	560 630	555 984
人口密度/(人/km ²)	277	280	286	291	288
生猪出栏/万头	240.6	341.1	477.3	211.7	124
人类消耗磷量/[kg/(km ² ·a)]	144	146	149	152	150
动物消耗磷量/[kg/(km ² ·a)]	1 156	1 536	2 371	1 487	1 323
第一产业增加值/万元	391 484	523 554	760 705	805 311	931 988
第二产业增加值/万元	1 002 972	2 493 611	4 941 983	5 698 545	8 741 191
第三产业增加值/万元	990 277	1 780 531	3 941 710	6 690 832	10 361 240
农业/万元	323 597	441 264	612 959	712 086	763 603
牧业/万元	199 525	314 776	572 062	351 639	443 932

非食物性磷的主要来源是人们使用的含磷洗涤剂,占比约为7%~11%,对NAPI的影响较小,该部分主要受人类日常生活使用的清洁产品的影响。

根据统计年鉴数据,衢州市的三次产业结构发生了明显变化:2003年为16:42:42,2012年调整为8:51:41,到2022年进一步变化为5:43:52。其中,第一产业(包括农业、林业、牧业和渔业)的比重从2003年的16.4%持续回落至2022年的4.7%。但同一时期,该产业的总产值由391 484万元增长到931 988万元。这一反差说明,尽管第一产业的实际经济总量仍在增加,其在全市经济中的相对重要性有所下降,同时反映出该市农业正向更加绿色和可持续的模式转型,这也部分解释了磷肥用量逐步减少的现象。另一方面,第二产业比重在2012年前持续提高并成为主导,2012年后则出现下降,表明衢州市的经济发展重点正在向第三产业倾斜。

3.5 NAPI削减对策

人类食物动物饲料磷输入构成中,源自人类食物消费的部分占比不高,同时由于人口密度变动较小,实际推行人口疏导难度较大,可操作性不强。相对而言,动物饲料所带来的磷输入更为显著,因此通过调控畜牧业规模来管理磷输入更具实际价值。分析近二十年的数据,生猪出栏数量是左右该组分变化的核心要素。参考秦越^[27]的研究成果,全国人均年猪肉消耗量约19千克。如仅以保障衢州本地猪肉供应为目标,可将生猪出栏数量调整至55万头,较原规模下降约56%。调整后,人类食物动物饲料部分磷输入可下降20%。该地区原

有生猪产值为25.57亿元,畜牧业总产值为44.39亿元。如仅供应本地猪肉消费,且其他产业保持不变,则生猪产值将约降至11.38亿元,畜牧业总产值相应降至33.01亿元。对磷输入问题,可在满足衢州区域猪肉自给的情况下适度减少出口,同时通过优化农业畜牧业结构,引导畜牧业向高质量、可持续发展方向转型。

肥料磷输入部分在衢州近几年的治理下,农业磷肥的施用量有所降低,随着城镇化进程的加快,未来农业用地面积可能也会减少,如果不能科学地投入化肥的使用,可能会破坏区域内磷素循环的平衡,增加磷污染的风险,因此,控制区域内肥料施用是一个重要的措施,并且近年来衢州的磷肥施用也得到了有效控制,施用量已经逐年减少,但依旧有下降空间,2022年衢州单位面积施肥量为3.4 t/km²。参考Ludemann等^[28]统计的联合国粮农组织多国数据,选取美国、以色列、澳大利亚、加拿大、荷兰、德国、俄罗斯、法国和阿根廷这九个农业先进国家的磷肥施用平均水平1.6 t/km²作为目标,衢州肥料磷输入可减少180 kg/(km²·a)。由此可见,降低磷肥使用是一项直接且高效的策略。建议衢州在保障当前农业生产水平的前提下,逐步将磷肥施用量调整至1.6 t/km²。预计在该施肥标准下,肥料磷输入可下降约52%。可降低至164 kg/(km²·a)(表5),并且注重提升化肥利用率,该措施对减少肥料磷输入和肥料挥发产生的磷都具有明显作用。

非食物性磷的主要来源是人们日常使用的含磷洗涤剂,近年来大力推广无磷洗涤剂,可减少人们日常生

表5 NAPI削减策略及期望值
Table 5 NAPI abatement strategies and expectations

NAPI 组分	2022NAPI/[kg/(km ² ·a)]	减磷措施	降低 /[kg/(km ² ·a)]	降低 百分比	预计降低至 /[kg/(km ² ·a)]
肥料磷输入	344	减施磷肥	180	52%	164
食物/饲料磷输入	1 217	减少生猪产量	247	20%	970
非食物性磷输入	182	使用无磷洗涤剂	60	33%	122
合计	1 743		487	28%	1 256

活造成的磷输入由尤本胜等^[29]的研究可知禁磷前洗衣粉含磷量平均为5.330%,无磷洗衣粉含磷量平均为0.011%,人均洗衣粉用量为0.94 kg/a,因此当衢州区域内洗衣粉换为无磷洗衣粉后这部分将会降低60 kg/(km²·a),如果全部换为换成无磷洗衣粉后非食物磷输入这个组分将会降低33%。可以看出无磷洗涤剂的普及可以大大降低非食物磷的部分,并且非食物磷部分虽然占比小,但是作为最容易降低的组分,因此要做好洗涤剂禁磷的相关政策。

如表5所示,衢州实施减少磷肥施用,减少生猪产量以及区域内采取无磷洗涤剂三个削减措施后,衢州的NAPI将会降低至1 256 kg/(km²·a),与国内NAPI值1 000~8 000 kg/(km²·a),对比可知处于较低水平。

由表6可以看出,各研究单元的施肥水平均高于1.6 t/km²的建议施用水平。其中江山市施肥水平为4.7 t/km²、衢江区为3.6 t/km²、开化县为3.4 t/km²,龙游县为2.8 t/km²,常山县为2.4 t/km²,柯城区为2.4 t/km²,其中江山市、衢江区、开化县的施肥水平有较大降低空间,因此这3个区域要注重减少单位面积上的施肥量可以减少肥料磷输入的部分。由生猪产量来看,龙游县>衢江区>江山市>开化县>常山县>柯城区,可以看出在龙游县、衢江区和江山市的生猪产量是该区域的NAPI的主要影响因素,其生猪饲养量较大分别为48.00、30.75和21.57万头,具体措施可偏向于减少生猪产量以减少人类食物动物饲料磷输入部分。人口密度影响人类食物动物饲料磷输入和非食物磷输入,其中柯城区人口密度最大为732人/km²,因此在该区域要注重减少非食物性磷大的措施,要注重不含磷洗涤剂的推广。综上所述龙游县要注重畜牧业的养殖方式或者适当减少生猪产量减少人类食物动物饲料磷输入,衢江区重点可在磷肥施用和畜牧业,柯城区由于人口密集要注重减少非食物性磷输入,江山市的磷肥施用水平在全市为超高水平主要注意磷肥的施用,常山县和开化县均可减少磷肥施用和畜牧业发展。

表6 各研究单元NAPI主要影响因素

Table 6 Main factors influencing NAPI in each study unit						
影响因素	常山县	江山市	开化县	柯城区	龙游县	衢江区
磷肥施用/(t/km ²)	2.4	4.7	3.4	2.4	2.8	3.6
生猪产量/万头	10.28	21.57	10.88	2.54	48.00	30.75
人口密度/(人/km ²)	308	301	160	732	345	234

4 结论

衢州市NAPI估算结果表现出显著的时空差异性。从时间分布来看,NAPI数值由2003年的1 825.52 kg/(km²·a)增长到2011年的2 982.79 kg/(km²·a),之后持续回落,2022年已降至1 743.03 kg/(km²·a)。该水平约为发达国家的2倍,在国内属于中等。在空间分布上,全市NAPI呈现自西向东递增的趋势,且与土地利用类型具有明显关联。各区、县及地级市的峰值多出现在2010—2012年间。

2) 衢州的NAPI组成主要包括:磷肥施用量占比约为19%~33%,人类食物动物饲料磷输入占比约为58%~75%,非食物性磷占比约为7%~11%。影响NAPI的最主要因素是人类食物动物饲料磷输入,其次是磷肥使用。衢州NAPI与河流TP含量做相关性分析可得 $P(=0.018)<0.05$ 为显著相关,表现出该区域计算的NAPI结果与实际情况相符。

3) 减少NAPI的主要策略包括:建议适当减少农田中磷肥的使用量,逐步推动施肥标准向国际先进农业水平靠拢;结合衢州市本地居民对畜禽产品的实际消费需求,科学合理地控制养殖规模;全面倡导并推广无磷洗涤剂的使用。落实上述措施后,预计可使衢州市的NAPI依次减少约180、247、60 kg/(km²·a),总计下降约487 kg/(km²·a),从而降至全国较低水平。其中龙游县重点为畜牧业发展,衢江区、常山县和开化县重点在磷肥施用和畜牧业,柯城区由于人口密集要注重减少非食物性磷输入,江山市重点要减少磷肥的施用。

参 考 文 献

- [1] Filippelli G M. The global phosphorus cycle: past, present, and future[J]. *Elements*, 2008, 4(2): 89–95.
- [2] 张小林, 张靖天, 迟春娟, 等. 乌溪江梯级水库的营养特征及水生态健康评价[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(5): 502–509.
- [3] 欧阳威, 黄浩波, 蔡冠清. 巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(4): 1024–1031.
- [4] Russell M J, Weller D E, Jordan T E, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs: spatial and temporal variability in the Chesapeake Bay region[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(3): 285–304.
- [5] Howarth R W, Billen G, Swaney D, et al. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35(1): 75–139.
- [6] Han H, Allan J D, Bosch N S. Historical pattern of phosphorus loading to Lake Erie watersheds[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38(2): 289–298.
- [7] Hong B, Swaney D P, Mrth C M, et al. Evaluating regional variation of net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI), major drivers, nutrient retention pattern and management implications in the multinational areas of Baltic Sea basin [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 227: 117–135.
- [8] Sobota D J, Harrison J A, Dahlgren R A. Linking dissolved and particulate phosphorus export in rivers draining California's central valley with anthropogenic sources at the regional scale[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(4): 1290–1302.
- [9] Han Y G, Yu X X, Wang X X, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs (NAPI) index application in mainland China[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(2): 329–337.
- [10] 陈丽娜, 张文硕, 徐俊增, 等. 基于SWAT模型的南方水稻灌区全生育期面源污染特征及控制模拟[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 198–205.
- [11] 岳帅均, 姬广兴, 黄珏婧, 等. 基于PLUS和InVEST模型的京津冀地区氮素面源污染时空特征分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(5): 2767–2782.
- [12] Jordan T E, Weller D E. Human contributions to terrestrial nitrogen flux[J]. *BioScience*, 1996, 46(9): 655–664.
- [13] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [14] Van H H H. Factors affecting manure quantity, quality, and use[C]. *Proceedings of the mid-south ruminant nutrition conference*, Dallas- Ft. 1998: 9–20.
- [15] 月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京医科大学出版社, 2002.
- [16] 戈蕾, 葛大兵. 城市家庭生活污水水量调查与水质分析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(2): 16–17.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [18] Mao Y P, Zhang H, Tang W Z, et al. Net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs in Pearl River Delta region (2008–2016)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282(3): 111952.
- [19] Han H, Bosch N, Allan J D. Spatial and temporal variation in phosphorus budgets for 24 watersheds in the Lake Erie and Lake Michigan basins[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1): 45–58.
- [20] 高伟, 高波, 严长安, 等. 鄱阳湖流域人为氮磷输入演变及湖泊水环境响应[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(9): 3137–3145.
- [21] 刘艳萍, 肖雅倩, 张颖. 洞庭湖流域人类活动净磷输入及其空间分布[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2404–2414.
- [22] 邓陈宁, 张泽乾, 徐睿, 等. 成渝地区双城经济圈人类活动氮磷输入时空演变及其驱动因素[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(7): 1596–1604.
- [23] 马华, 雷秋良, 杜新忠, 等. 河南省人类活动净磷输入的时空变化与影响参数[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1318–1326.
- [24] Zhang W S, Swaney D P, Hong B, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs and riverine phosphorus fluxes in highly populated headwater watersheds in China[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 126(3): 269–283.
- [25] Zhong W J, Wang S R, Dong Y, et al. Trends of the response-relationship between net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI) and TN/TP export fluxes in Raohe basin, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131662.
- [26] Zhang X X, Yi Y J, Yang Z F. Nitrogen and phosphorus retention budgets of a semiarid plain basin under different human activity intensity[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134813.
- [27] 秦越. 中国居民肉类消费特征与趋势研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [28] Ludemann C I, Gruere A, Heffer P, et al. Global data on fertilizer use by crop and by country[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 501–508.
- [29] 尤本胜, 张艳红, 操庆等. 太湖流域洗涤剂禁磷政策评估研究[J]. *环境与发展*, 2022, 34(4): 218–222.

The Spatiotemporal Dynamic Changes in Net Anthropogenic Phosphorus Input (NAPI) in Quzhou City from 2003 to 2022

YANG Yuhang¹, HAN Yuguo^{1,2,3,*}, ZHANG Xiaolin⁴

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China;

3. Forest Ecosystem Studies, National Observation and Research Station, Jixian Shanxi 042200, China;

4. Quzhou Wuxi River Drinking Water Source Protection Management Center, Quzhou Zhejiang 324003, China)

Abstract: The Qujiang River Basin was a vital water source for Quzhou City and Zhejiang Province. Increasing human activities were found to significantly disrupt the phosphorus cycle in Quzhou, leading to frequent phosphorus pollution. To address this, the net anthropogenic phosphorus input (NAPI) model was used to estimate Quzhou's phosphorus input from 2003 to 2022, and its spatiotemporal patterns, component changes, and influencing factors were analyzed. Results showed that Quzhou's average NAPI over 20 years was 2,204 kg/(km²·a), which peaked at 2,983 kg/(km²·a) in 2012 before declining. Spatially, NAPI was observed to be higher in the east and lower in the west, closely linked to land use and significantly correlated with river total phosphorus (TP) levels ($P=0.018<0.05$). NAPI composition was found on average 58%-75% from food/feed, 19%-33% from fertilizer, and 7%-11% from non-food sources. From 2003 to 2022, changes in NAPI were primarily driven by food/feed input, followed by fertilizer, with non-food sources having minimal impact. To reduce NAPI, key measures were proposed, including controlling fertilizer use and aligning standards with advanced agricultural countries, regulating livestock farming based on local needs, and promoting phosphate-free detergents. These steps were expected to cut NAPI by 180, 247, and 60 kg/(km²·a), respectively, totaling 487 kg/(km²·a), achieving a relatively low national level.

Keywords: net anthropogenic phosphorus input (NAPI); Qujiang River Basin; characteristics of spatial and temporal variations; mitigation strategy