

漓江流域上游非点源污染负荷估算

代俊峰^{1,2,3,4}, 全秋慧³, 方荣杰^{3,4}, 曾鸿鹄^{3,4}, 张红艳³, 徐勤学^{3,4}, 杨利超^{1,2}

(1. 国土资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;
4. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要:采用径流分割法(丰枯径流差值法)、降雨量差值法和径流量差值法,基于 2005—2014 年各月水文和水质数据,进行漓江流域上游非点源污染负荷量的估算。结果表明,径流分割法的非点源污染负荷计算精度最高,丰枯水期污染物负荷差值和流量差值的拟合方程决定系数在 0.88 以上;基于径流分割法的污染物总负荷计算值和实测值的决定系数在 0.91 以上,计算值与实测值的结果接近。与氨氮和高锰酸盐指数相比,不同方法计算的总磷非点源污染比例呈现较强的稳定性。径流分割法的计算结果显示,2005—2014 年高锰酸盐指数的非点源比例平均值为 0.70,氨氮的非点源比例平均值为 0.73,总磷的非点源比例平均值为 0.74,说明非点源污染对漓江流域上游水质的贡献率较高。

关键词:非点源污染;径流分割法;降雨量差值法;径流量差值法;漓江

中图分类号:TV121⁺.1,X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)05-0057-07

Estimation of non-point source pollution load in upstream of Lijiang River//DAI Junfeng^{1, 2, 3, 4}, QUAN Qiuhui³, FANG Rongjie^{3, 4}, ZENG Honghu^{3, 4}, ZHANG Hongyan³, XU Qinxue^{3, 4}, YANG Lichao^{1, 2} (1. Key Laboratory of Karst Dynamics of MLR & Guangxi, Guilin 541004, China; 2. International Research Center on Karst Under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the hydrological and water quality data during 2005-2014, runoff division method, rainfall deduction method and runoff deduction method were used to evaluate the non-point source pollution respectively in the upstream of Lijiang River. Compared with rainfall deduction method and runoff deduction method, the accuracy of runoff division method is the highest. The relationship between pollution load difference and runoff difference in wet and dry period can be described by a linear equation, with R^2 values greater than 0.88. The calculated values of pollution load using runoff division method were significantly correlated with the measured values, and the R^2 reached 0.91. Compared with $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD_{Mn} , the ratio of non-point source pollution to total pollution load of TP calculated by the different methods showed strong stability. The Average value caculated by runoff division method showed that the ratio of non-point source pollution to total pollution load of COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP was 0.70, 0.73 and 0.74 respectively. It shows that non-point source pollution load highly contributes to the water quality in the upstream of Lijiang River.

Key words: non-point source pollution; runoff division method; rainfall deduction method; runoff deduction method; Lijiang River

非点源污染由于涉及范围广、控制难度大,已成为影响流域水环境的重要污染源。国际上 20 世纪 70 年代开始重视对非点源污染的研究,这个时期定量化研究较少,主要研究非点源污染产生的原因,以及土地利用^[1]等诸多因素对污染物负荷的影响。

随后,国内外学者关注非点源污染的定量化计算,提出了适合特定资料条件的非点源污染负荷估算方法,如污染分割法、降雨量差值法、输出系数法、相关关系法等,以及非点源污染模型。不同气象和下垫面条件的流域非点源污染定量估算,可以为区域非

基金项目:国家自然科学基金(51569007);国际岩溶研究中心国际合作项目开放课题(KDL201601);广西壮族自治区自然科学基金(2015GXNSFCA139004)

作者简介:代俊峰(1980—),男,教授,博士,主要从事水资源高效利用与水环境研究。E-mail:whudjf@163.com

点源污染控制和管理^[2]、改善水体环境提供参考和决策依据。

漓江流域位于广西东北部,属典型喀斯特(岩溶)区,是世界喀斯特地貌代表性区域,2013 年 CNN 评选 15 条全球最美河流,漓江是唯一入选的中国河流。由于漓江枯水期水量小,河流稀释、自净能力低,以及农业污水、生活污水的排放,使得漓江的水环境质量不容乐观。2012 年 1 月,《广西壮族自治区漓江流域生态环境保护条例》正式施行。2014 年 6 月,桂林喀斯特作为“中国南方喀斯特二期”重要提名地,成功入选世界自然遗产名录。桂林喀斯特地貌以漓江流域为代表,如何保护漓江生态环境值得关注。

一些学者开展了漓江氮磷的试验研究^[3-5],以及漓江流域中游会仙湿地氮磷的试验分析^[6],但漓江流域氮磷非点源污染的定量估算研究较少。由于缺少全面的、连续的氮磷污染负荷监测资料,且不同地区氮磷非点源污染的产生机理和过程复杂且有所不同,非点源污染的估算较为困难。理论上分析,降雨的大小和强度,降雨产生的径流量大小和流速,都对非点源污染负荷有影响。建立降雨量和径流量与非点源污染负荷之间的相关关系,可为流域非点源污染负荷的预测和治理提供参考^[7]。本文基于 2005—2014 年月尺度水文和水质数据,采用径流分割法(丰枯径流差值法)、降雨量差值法^[8]和径流量差值法^[9],对漓江上游非点源污染负荷量进行估算。

1 研究区域概况

漓江属于珠江水系,发源于华南第一峰猫儿山,全长 214 km,流域面积 12 285 km²,漓江流域水系见图 1。漓江流域为上、下游两头较窄,而中间宽的长形多支流河系^[10]。桂林水文站以上为漓江流域上游,集水面积为 2 762 km²,流域平均宽度为 39.2 km,干流长 105 km,其中大溶江至桂林之间为岩溶峰林平原,河床比降为 0.094%,桂林市区段河床平均比降为 0.044%。本文的具体研究范围为漓江流域上游。

1.1 地貌特征

漓江流域属亚热带季风气候,年平均气温 19℃,冬季较短,夏季较长,雨水丰沛。漓江流域上游的上部和中部森林植被发育较好,主要分布着由碎屑岩组成的常态中低山,地表沟谷深切,使得地表水系发育,土壤以深厚的黄壤和红黄壤为主。漓江流域上游的下部为典型岩溶地貌区,主要是由碳酸盐岩溶蚀为主形成的峰丛洼(谷)地、峰林平原,土壤主要有红黄壤和红壤,集中分布于洼地、平原和缓坡;而山区土壤的厚度浅薄甚至基岩裸露,地表水系

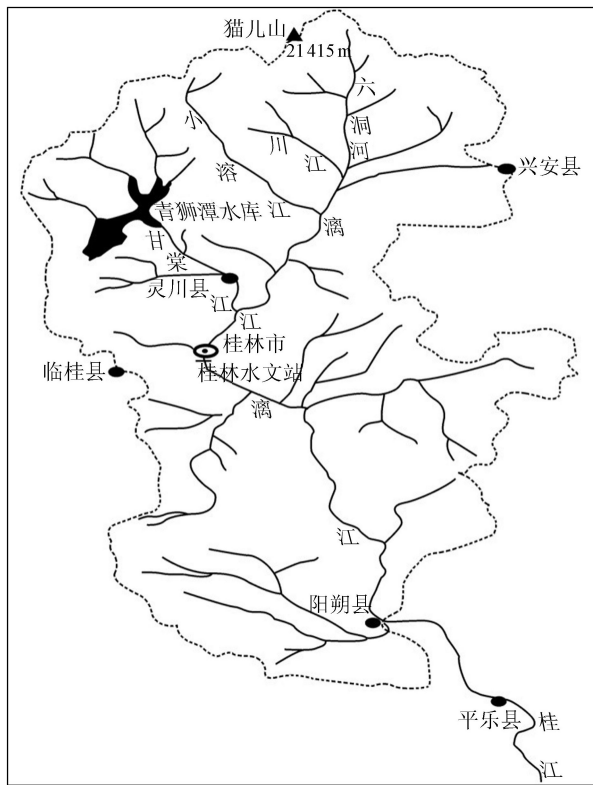


图1 漓江流域及其上游水系分布示意图

不太发育^[11]。

1.2 水文特征

漓江流域多年平均降水量为 1 900 mm,降水分布从西北向东南递减^[12]。漓江属于雨源型河流,水资源相对丰富,年最大径流模数为 55.8 dm³/(s·km²),平均为 38.8 dm³/(s·km²)。漓江流域上游多年平均径流量为 40.3 亿 m³,年内各月径流分配与流域降水量年内分配相似,高值期与低值期相差 8.4 倍,其中丰水期 4—8 月径流量占全年的 77.5%,主汛期 5—6 月占 37.7%,枯水期 12 月到次年 1 月占 4.5%。

漓江的泥沙主要来源于上游的兴安、灵川和桃花江,由暴雨洪水冲刷形成,泥沙主要类型为悬沙,河床主要由卵石、砂等组成。漓江含沙量少,年输沙量约 172 万 t,是含沙量最小的广西河流。

1.3 工农业生产

漓江是国家重点保护河流之一,是桂林市工农业用水、生活饮用水和经济活动的主要水源地,也是本地区最终纳污水体。漓江流域上游的点源污染主要是工业废水和城市生活污水,其中工业废水主要来自纸品、水泥、矿业、医药、电子等行业,以及污水处理厂。

漓江流域上游的主要生产活动是农业与渔业,粮食作物以水稻为主,漓江沿岸也种植蔬菜和水果、苗木等经济作物。漓江流域内农业灌溉面积为

416 万 hm^2 ,农田内施用的农药、化肥,农村水产家禽养殖和生活污水等随地表水、地下水运动而进入漓江,导致漓江氮、磷污染。

2 非点源污染负荷估算方法

流域水质监测的污染物成分包括点源和非点源污染物,如何采用简单、有效的方法,从有限的水质监测资料中定量分离出非点源负荷,并获得合理的、可以接受的计算精度,是相关学者一直关心的问题。径流分割法、降雨量差值法、径流量差值法是常用的几种非点源污染负荷估算方法。

2.1 径流分割法

径流 Q 包括地表径流 Q_s 和河川基流 Q_g ,降雨径流的冲刷是非点源污染负荷 L_n 产生的原动力,径流排水是非点源污染物运移的载体。为简化非点源污染负荷计算过程,假定非点源污染主要由汛期地表径流引起,而枯水季节的水质污染主要由点源污染所引起^[13]。进行非点源污染负荷估算时,径流分割法^[14-15]先由降水量推求径流量或者直接利用径流量实测值,将径流量分割为汛期地表径流和枯季径流,以枯水期的平均流量作为河川基流量,平均浓度作为基流浓度,然后进行污染物的分割计算。

2.2 降雨量差值法

无降雨量或者降雨量小而不产生地表径流时,流域的污染主要由点源污染引起。当降雨产生地表径流时,流域同时发生点源污染和非点源污染。一般来说,点源污染相对稳定,降雨量插值法视年内(或一段时间内)点源污染负荷变化波动不大。任意两年洪水(或任意两月,任意两场)产生的污染总负荷(包括点源和非点源)之差 ΔL 应为这两年降水量之差 ΔP 引起的非点源污染负荷 L_n 。据此,可以建立降水量差值 ΔP 与非点源污染负荷差值 ΔL_n 之间的相关关系,降雨量差值法的计算公式详见文献^[8]。

降雨量差值法避开了污染物从产生到流出流域出口的迁移转化过程,直接估算流域出口的非点源

污染负荷,属于黑箱模型,可应用于径流量观测资料缺乏的地区^[7,16]。

2.3 径流量差值法

一般来说,如果没有地表径流 Q_s 的产生,非点源污染物很难进入受纳水体。因此,非点源污染负荷 L_n 与地表径流 Q_s 存在密切关系。

假定流域各年(月)点源污染负荷排放量为常数,则流域相邻各年(月)出口断面总负荷差值 ΔL 可认为是由径流过程引起的非点源污染负荷 L_n 。据此, ΔL 与相邻各年(月)地表径流量差值 ΔQ_s 之间存在函数关系。利用径流量差值法计算非点源污染负荷 L_n 的方法详见文献^[9]。

3 非点源污染负荷估算

本文收集了桂林水文站 1980—2014 年各月流量资料和 2005—2014 年各月水质资料,考虑到水量水质资料的同步性,以 2005—2014 年各月的水质和流量资料为基础,采用径流分割法、降雨量差值法和径流量差值法,建立降水量 P 或径流量 Q 与非点源负荷 L_n 的相关关系,对漓江流域上游的主要非点源污染物高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总磷(TP)进行分析。

3.1 基于径流分割法的非点源污染负荷估算

对于漓江流域,4—8 月为丰水期,2—3 月、9—11 月为平水期,12 月至翌年 1 月为枯水期。计算丰水期与枯水期的流量差值和相应的断面污染物通量差值,建立其相关关系(图 2)。结果显示,丰、枯水期的断面污染物通量差值和流量差值拟合方程的决定系数在 0.887~0.929 之间,说明两者的相关性较好。

按丰水期、平水期、枯水期分别统计监测断面的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 质量浓度(表 1),进而计算得到非点源污染负荷和点源污染负荷(表 2)。其中,年污染物负荷实测值由月污染物负荷实测值加和求得,月污染物负荷实测值由月流量与月污染物实测平均质量浓度的乘积来计算。

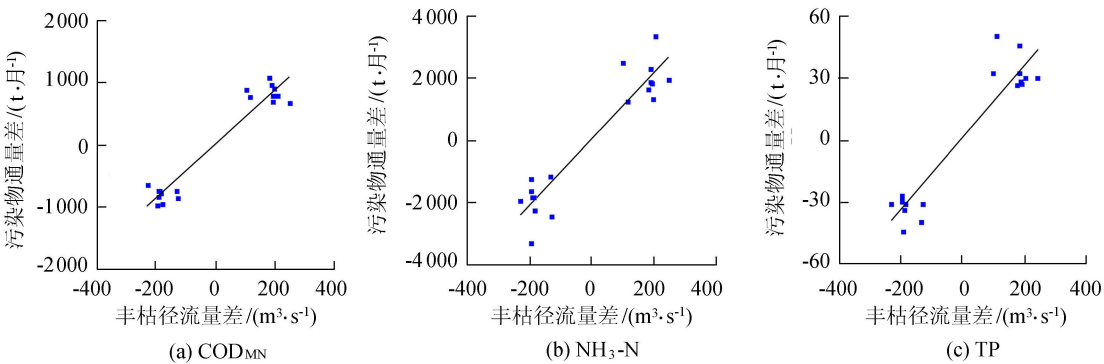


图 2 相邻丰水期与枯水期断面污染物通量差值与径流量差值的相关关系

表 1 不同水情条件下的断面污染物质量浓度

年份	丰水期				平水期				枯水期			
	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	污染物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	污染物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	污染物质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
		COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP		COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP		COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP
2005	223.3	1.78	0.228	0.064	71.88	2.20	0.284	0.123	30.45	2.40	0.845	0.121
2006	211.6	1.60	0.320	0.076	56.62	1.14	0.204	0.081	26.45	1.90	0.555	0.129
2007	147.8	1.54	0.212	0.096	50.96	2.18	0.330	0.126	17.95	1.90	0.695	0.205
2008	220.8	1.52	0.318	0.086	84.14	1.70	0.228	0.070	32.60	1.70	0.255	0.070
2009	224.4	2.04	0.282	0.054	35.62	2.20	0.382	0.068	29.75	2.60	0.300	0.055
2010	271.3	1.34	0.338	0.062	34.08	1.50	0.314	0.052	43.45	1.55	0.450	0.065
2011	150.8	1.70	0.428	0.064	44.16	1.68	0.260	0.068	23.05	1.60	0.670	0.075
2012	229.8	1.88	0.389	0.062	62.56	2.20	0.355	0.096	48.50	1.55	0.320	0.065
2013	233.6	1.54	0.570	0.058	82.52	1.60	0.2268	0.042	40.70	1.85	0.299	0.045
2014	233.6	1.46	0.235	0.058	52.62	1.66	0.2558	0.064	26.15	1.55	0.231	0.045

表 2 径流分割法污染负荷计算结果

年份	COD _{Mn}				NH ₃ -N				TP			
	计算值			实测 总负荷	计算值			实测 总负荷	计算值			实测 总负荷
	非点源	点源	总负荷		非点源	点源	总负荷		非点源	点源	总负荷	
2005	4837	2461	7298	7439	534	403	937	1057	188	136	324	311
2006	4182	1112	5294	5605	812	229	1041	1029	211	78	289	278
2007	2811	1638	4449	4678	346	286	632	671	186	104	290	294
2008	4118	2170	6287	6266	879	296	1174	1073	249	89	339	320
2009	5607	1435	7043	8389	784	226	1010	1004	159	40	199	202
2010	4422	1025	5447	5799	1102	243	1345	1338	221	38	259	244
2011	3181	1168	4349	3569	766	232	998	976	127	49	175	162
2012	5279	2202	7482	8540	1093	373	1466	1671	187	95	282	306
2013	4329	2129	6458	6583	1685	310	1995	1956	178	55	233	231
2014	4266	1360	5626	5721	692	209	900	933	178	50	228	232

为了评价径流分割法的计算结果,采用线性回归法分析径流分割法计算的污染物总负荷与实测值的符合程度(图3)。结果表明,污染物总负荷的计算值和实测值的决定系数在0.918~0.949之间,散点均匀地分布在拟合直线的两侧,说明径流分割法

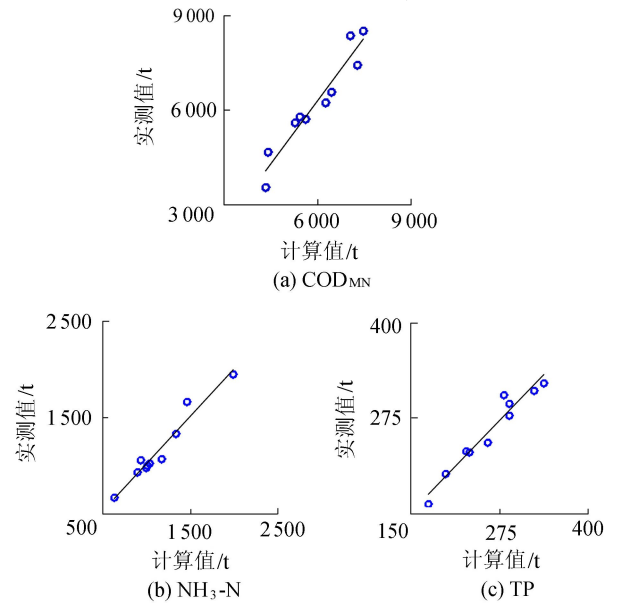


图 3 基于径流分割法的污染物总负荷计算值与实测值的相关关系

的计算结果合理、可信。

3.2 基于降雨量差值法的非点源污染负荷估算

根据月降水量差值和断面污染物通量差值,建立其相关关系如图4所示。图4显示,在月降水量差小于150 mm时,相关关系图的散点较为集中,分布于拟合直线的附近。但当月降水量差值大于150 mm,尤其是大于300 mm时,散点偏离拟合直线的程度较大。

拟合得到月污染物通量差值与降水量差值的函数关系为

$$\Delta L_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = 2.880\Delta P - 0.768 \quad (1)$$

$$\Delta L_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.449\Delta P - 0.929 \quad (2)$$

$$\Delta L_{\text{TP}} = 0.100\Delta P - 0.091 \quad (3)$$

式中: $\Delta L_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 $\Delta L_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 、 ΔL_{TP} 分别为相邻月份 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 通量的差值,t; ΔP 为相应月份降水量差值,mm。此式可理解为非点源污染单一地由降水引起。

将各月降水量分别代入式(1)(2)(3),计算得到出口断面各污染物的非点源负荷 L_n ,出口断面实测污染物通量减去 L_n 即为流域点源污染负荷^[17]。

3.3 基于径流量差值法的非点源污染负荷估算

以当年的最枯月经流为基流,计算各月的地表

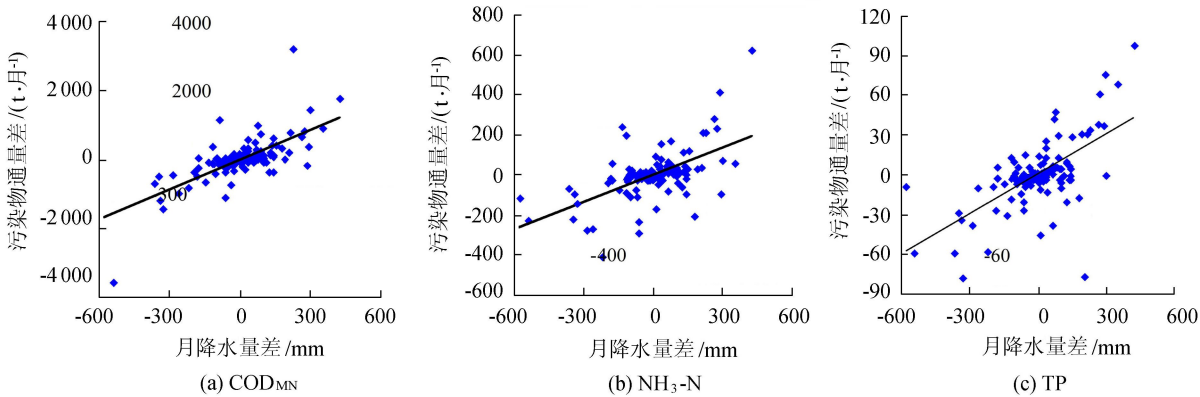


图4 相邻月份污染物通量差值与降水量差值的相关关系

径流,建立相邻月地表径流量差值和断面污染物通量差值的相关关系如图5所示。

拟合得到相邻月污染物通量差值与地表径流量差值的函数关系为

$$\Delta L_{\text{COD}_{\text{Mn}}} = 4.642\Delta Q_s - 0.900 \quad (4)$$

$$\Delta L_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0.650\Delta Q_s - 0.948 \quad (5)$$

$$\Delta L_{\text{TP}} = 0.156\Delta Q_s - 0.096 \quad (6)$$

式中 ΔQ_s 为相邻月地表径流量差值, m^3/s 。此式可理解为非点源污染单纯地由地表径流引起。

将流域各月径流量值分别代入式(4)(5)(6),可计算得到各污染物的非点源负荷 L_n ,出口断面污染物实测通量减去 L_n 即得点源污染负荷。

3.4 污染物非点源比例分析

3种方法计算的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的非点源污染负荷占实测总污染负荷的比例(以下简称非点源

比例)如图6所示。图6表明,径流分割法计算的2005—2014年 COD_{Mn} 的非点源比例为0.60~0.89,平均值为0.70; $\text{NH}_3\text{-N}$ 的非点源比例为0.51~0.86,平均值为0.73; TP 的非点源比例为0.60~0.91,平均值为0.74。总体而言,漓江流域上游非点源污染比例较大,对漓江水质的贡献率较高。

图6(a)显示,降雨量差值法和径流量差值法计算的 COD_{Mn} 非点源比例平均值分别是0.86和0.90。这两个方法计算的 COD_{Mn} 非点源比例大于径流分割法的计算结果,高出22.86%~28.57%,在个别年份明显偏高,例如,2006、2008、2010、2011、2014年的 COD_{Mn} 非点源比例接近或大于1.0。

图6(b)表明,降雨量差值法和径流量差值法计算的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 非点源比例平均值分别为0.72和0.68,与径流分割法的计算值比较接近,相差-1.37%~-6.85%,但在个别年份相差较大。

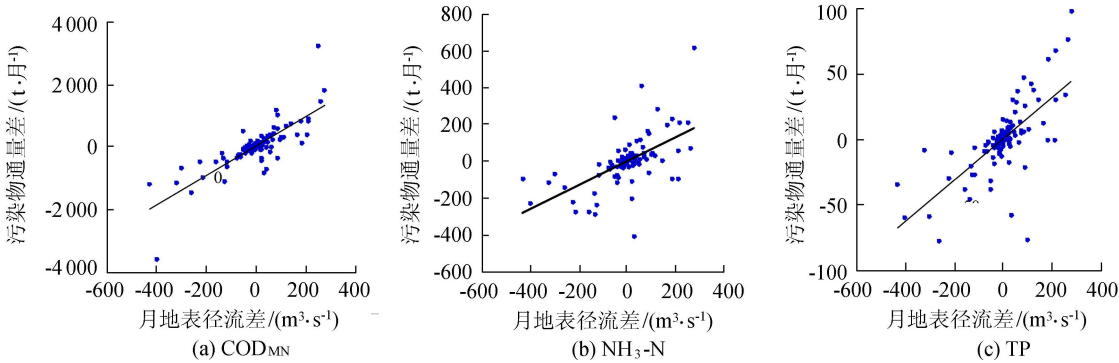


图5 相邻月份污染物通量差值与地表径流量差值的相关关系

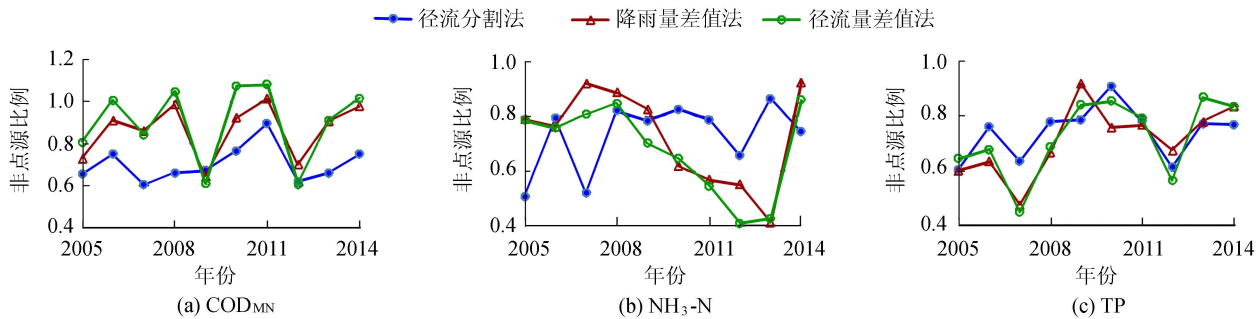


图6 不同方法计算的污染物非点源比例

图 6(c) 显示,降雨量差法和径流量差法计算的 TP 非点源比例平均值分别为 0.71 和 0.72,与径流分割法的计算值相差不大(-4.11% ~ -1.37%),且在各年的变化趋势一致。

如上分析,针对 2005—2014 年数据的分析结果而言,径流分割法(丰枯径流差值法)计算的漓江流域上游非点源比例合理。与径流分割法相比,降雨量差值法和径流量差值法计算的 TP 非点源比例较为合理,两种方法计算的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 非点源比例的精度也可接受,但其计算的 COD_{Mn} 非点源比例精度不高。

4 讨论

径流分割法、降雨量差值法和径流量差值法 3 种计算方法在漓江流域上游的计算结果表明,径流分割法的丰枯径流量差值与非点源污染负荷的相关性最好,决定系数在 0.88 以上。月径流量差值和月降雨量差值与非点源污染的相关性低于丰枯径流差值的,其决定系数在 0.331 ~ 0.656 之间,说明非点源污染负荷与降雨和径流量不是简单的线性关系,还与降雨的强度和径流的流速等因素有关,漓江流域的岩溶地貌也是影响非点源污染负荷不可忽视的因素。漓江流域岩溶发育等复杂的下垫面条件,影响着污染物到达流域出口的运动过程。由于岩溶发育地区土壤厚度薄、不连续或土壤表层缺失,表层储水介质的孔隙率、裂隙率高,导致其降水入渗透率较高,再加上岩溶裂隙的存在,使得非点源污染物可以随着壤中流和基流而运动,从而减弱了非点源污染与地表径流的相关性。

由于非点源污染的产生受气候、水文、下垫面和农业管理等因素的综合影响,使得非点源污染的产生具有不确定性,采用不同方法进行非点源污染负荷估算时,其结果可能具有一定的差异性。本文的计算结果表明,漓江流域上游 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的非点源比例在不同计算方法之间呈现较大的差异性,说明其计算结果具有一定的不确定性。而 TP 则呈现较强的稳定性,不同方法计算得到的非点源比例相差不大。

漓江流域上游地形较为复杂,不同地区气象条件存在一定差异,采用一个站点的降水资料表征漓江流域整个面的降水情况,会给计算结果带来一定的误差。另外,采用 2005—2014 年一个站点的月水质数据,数据序列也较短。今后有必要搜集多站点、更长时间的水量水质数据,进行进一步的分析。

5 结论

a. 2005—2014 年水质数据分析结果显示,径流

分割法(丰枯径流差值法)计算的漓江流域上游 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 非点源污染负荷结果合理,丰水期与枯水期的污染物负荷差值和丰枯流量差值拟合方程的决定系数在 0.88 以上,说明两者的拟合程度较好。径流分割法的污染物负荷计算值和实测值的决定系数在 0.91 以上,计算值与实测值的结果接近。

b. 采用降雨量差法和径流量差法计算 TP 的非点源比例较为合理,而采用降雨量差法和径流量差法计算 COD_{Mn} 非点源比例偏高。

c. 基于径流分割法计算的 2005—2014 年漓江流域上游 COD_{Mn} 的非点源比例平均值为 0.70, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的非点源比例平均值为 0.73, TP 的非点源比例平均值为 0.74,说明这 3 种污染物的非点源比例较为接近,非点源污染对漓江流域上游水质污染的贡献率较大。

参考文献:

- [1] 李杨,马晓明. 深圳坪山河流域土地利用变化对流域非点源污染负荷的影响[J]. 水资源保护,2012,28(2): 42-45. (LI Yang, MA Xiaoming. Impacts of land-use change on non-point source pollution load in Pingshan River Watershed in Shenzhen City[J]. Water Resource Protection,2012,28(2):42-45. (in Chinese))
- [2] 张皓天,张弛,周惠成,等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):644-650. (ZHANG Haotian,ZHANG Chi,ZHOU Huicheng,et al. Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2010,38,(6): 644-650. (in Chinese))
- [3] 陈凯,张永祥,蔡德所,等. 漓江大型底栖无脊椎动物群落结构与水质生物评价[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2012,30(4):115-122. (CHEN Kai,ZHANG Yongxiang,CAI Desuo,et al. Benthic Macroinvertebrate community structure and water quality bioassessment in Lijiang River, Guilin, China [J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2012, 30 (4):115-122. (in Chinese))
- [4] 杨青瑞,陈求稳. 漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系[J]. 水利水电科技进展,2010,30(6): 8-10. (YANG Qingrui, CHEN Qiuwen. Relationship between macroinvertebrates and aquatic environment in Lijiang River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(6): 8-10. (in Chinese))
- [5] 周振明,陈朝述,刘可慧,等. 漓江桂林市市区段夏季浮游植物群落特征与水质评价[J]. 生态环境学报,2014,23(4): 649-656. (ZHOU Zhenming, CHEN Chaoshu, LIU Kehui. Phytoplankton community and water quality in guilin city section of Lijiang River in summer,China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(4): 649-656. (in Chinese))

- [6] 徐广平,王静,黄玉清,等. 桂林会仙岩溶湿地不同富营养化水体水葫芦营养成分研究[J]. 中国农学通报, 2012,28(26):262-266. (XU Guangping, WANG Jing, HUANG Yuqing, et al. Determinations of nutrient chemical components in eichhornia crassipes sloms-laub from different eutrophic waters in Huixian Karst Wetlands, Guilin, China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012,28(26):262-266. (in Chinese))
 - [7] 蔡明,李怀恩,刘晓军. 非点源污染负荷估算方法研究[J]. 人民黄河,2007,29(7):36-37,39. (CAI Ming, LI Huanen, LIU Xiaojun. Study on the estimation of non-point source pollution load[J]. Yellow River,2007,29(7):36-37,39. (in Chinese))
 - [8] 蔡明,李怀恩,庄咏涛. 估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(4):102-106. (CAI Ming, LI Huanen, ZHUANG Yongtao. Rainfall deduction method for estimating non-point source pollution load for watershed[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition),2005,33(4):102-106. (in Chinese))
 - [9] 李怀恩,李家科. 流域非点源污染负荷量化方法研究与应用[M]. 北京:科学出版社,2013.
 - [10] 靖娟利,王永锋. 漓江流域近15年遥感植被覆盖度变化特征[J]. 桂林理工大学学报,2014,34(2):260-265. (JING Juanli, WANG Yongfeng. Vegetation coverage changes in the Lijiang river basin based on remote sensing in recent 15 years[J]. Journal of Guilin University of Technology,2014,34(2):260-265. (in Chinese))
 - [11] 蔡德所,马祖陆. 漓江流域的主要生态环境问题研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2008,26(1):110-112. (CAI Desuo, MA Zulu. Main ecological problems in Lijiang River Watershed[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition,2008,26(1):110-112. (in Chinese))
 - [12] 张永祥,蔡德所,周铭. 基于GIS的漓江流域环境敏感性分析[J]. 中国水土保持,2012,(11):61-63. (ZHANG Yongxiang, CAI Desuo, ZHOU Ming. Environmental sensitivity analysis of Lijiang River Basin based on GIS[J]. Soil and Water Conservation in China, 2012,(11):61-63. (in Chinese))
 - [13] 郝芳华,杨胜天,程红光,等. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术[J]. 环境科学学报,2006,26(3):363-365. (HAO Fanghua, YANG Shengtian, CHENG Hongguang. The significance, difficulty and key technologies of large scale model applied in estimation of non-point source pollution[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006,26(3):363-365. (in Chinese))
 - [14] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报,2000,20(4):397-400. (LI Huanen. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000,20(4):397-400. (in Chinese))
 - [15] 陈友媛,惠二青,金春姬,等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究,2003,16(1):10-13. (CHEN Youyuan, HUI Erqing, JIN Chunji. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. Research of Environmental Sciences, 2003,16(1):10-13. (in Chinese))
 - [16] 黄国如,姚锡良,胡海英. 农业非点源污染负荷核算方法研究[J]. 水电能源科学,2011,29(11):28-32. (HUANG Guoru, YAO Xiliang, HU Haiying. Research on methods of agricultural non-point source pollution load calculation[J]. Water Resource and Power, 2011,29(11):28-32. (in Chinese))
 - [17] 刘庄,晁建颖,张丽,等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展,2015,26(3):432-442. (LIU Zhuang, CHAO Jianying, ZHANG Li, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China[J]. Advances in Water Science, 2015,26(3):432-442. (in Chinese))
- (收稿日期:2016-11-12 编辑:郑孝宇)
- +++++
- (上接第45页)
- [6] 唐容桂,张友明. 浅析水利工程管理现代化发展目标[J]. 水利发展研究,2010,5(5):53-55. (TANG Ronggui, ZHANG Youming. Analysis of water conservancy project management modernization development goal[J]. Water Resources Development Research,2010,5(5):53-55. (in Chinese))
 - [7] 龚承柱,李兰兰,卫振锋,等. 基于前景理论和隶属度的混合型多属性决策方法[J]. 中国管理科学,2014,22(10):122-128. (GONG Chenzhu, LI Lanlan, WEI Zhenfeng, et al. A method for hybrid multiple attribute decision making based on project theory and membership[J]. Chinese Journal of Management Science. 2014,22(10):122-128. (in Chinese))
 - [8] 陈守煜. 模糊识别、决策与聚类理论模型[J]. 模糊系统与数学,1991,5(2):83-91. (CHEN Shouyu, Theory and model of fuzzy clustering iteration. fuzzy system and mathematics[J]. Fuzzy Systems and Mathematics,1991,5(2):83-91. (in Chinese))
 - [9] 陈守煜,李庆国. 一种新的模糊聚类神经网络及其在水资源评价中的应用[J]. 水利学报,2005,36(6):662-667. (CHEN Shouyu, LI Qingguo. Fuzzy clustering neural network and its application to water resources assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2005,36(6):662-667. (in Chinese))
 - [10] 陈守煜. 模糊聚类循环迭代理论与模型[J]. 模糊系统与数学,2004,18(2):58-61. (CHEN Shouyu. Theory and model of fuzzy clustering iteration[J]. Fuzzy Systems and Mathematics. 2004,18(2):58-61. (in Chinese))
 - [11] YANG Yulan, TAI Huixin, SHI Tao. Weighting indicators of building energy efficiency assessment taking account of experts' priority[J]. Journal of Central South University of Technology,2012,19(3):803-808.
- (收稿日期:2016-11-18 编辑:郑孝宇)