

重庆主城区降雨径流污染特征及其社会影响因素分析

陈亚松¹, 闫玉亭², 朱雅婷¹, 张文龙², 赵云鹏¹, 李 轶²

(1. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为解析重庆主城区社会影响因素对降雨径流水质的影响,对2010—2021年政策影响下降雨径流水质的年际变化和降雨径流污染物指标进行相关性分析,采用对数平均迪氏指数法量化人口规模、技术创新、经济发展、产业结构4种社会影响因素对降雨径流水质的影响。结果表明:重庆主城区降雨径流水质呈改善趋势,且污染物指标相关性增强,2019年屋面降雨径流水质和2021年路面降雨径流水质均提升到“较清洁与污染”之间,固体悬浮物与COD、NH₃-N、TN、TP呈显著相关关系($p < 0.01$),屋面降雨径流中相关系数 $r > 0.75$,路面降雨径流中相关系数 $r > 0.50$;空气治理政策对屋面径流污染改善效果显著,海绵城市和排水系统建设政策的有效实施则对路面径流污染控制效果显著;社会影响因素中技术改善效应和产业结构效应对水质改善起主导作用,经济发展效应和人口规模效应对水质改善呈负向作用。

关键词:降雨径流污染;社会影响因素;内梅罗综合污染指数;LMDI分解模型;重庆主城区

中图分类号:X50

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)02-0117-09

Characteristics of rainfall-induced runoff pollution and its social influencing factors in main urban area of Chongqing City//CHEN Yasong¹, YAN Yuting², ZHU Yating¹, ZHANG Wenlong², ZHAO Yunpeng¹, LI Yi²
(1. Yangtze River Eco-Environmental Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the influence of social factors on the water quality of rainfall-induced runoff in the main urban area of Chongqing City, this study analyzed the inter-annual variations in the water quality of rainfall-induced runoff under policy influences from 2010 to 2021 and conducted a correlation analysis of pollutant indicators of rainfall-induced runoff. The logarithmic mean division index decomposition model was employed to quantify the effects of population size, technological innovation, economic development, and industrial structure on the water quality of rainfall-induced runoff. The findings revealed an improving trend in the water quality of rainfall-induced runoff in the main urban area of Chongqing City, accompanied by enhanced correlation between pollutant indicators. The water quality of roof runoff in 2019 and pavement runoff in 2021 improved to the range of “slightly clean to polluted”. Suspended solids demonstrated significant correlations with COD, NH₃-N, TN, and TP ($p < 0.01$), with the correlation coefficient $r > 0.75$ for roof runoff, and $r > 0.50$ for pavement runoff. The air control policies have a significant effect on reducing roof runoff pollution, while effective implementation of sponge city and drainage system construction policies plays a crucial role in controlling pavement runoff pollution. Technological innovation and industrial structure are the dominant factors affecting the runoff water quality, while economic development and population size have negative effects on water quality improvement.

Key words: rainfall-induced runoff pollution; social influencing factors; Nemerow comprehensive pollution index; LMDI decomposition model; main urban area of Chongqing City

随着城市化的快速发展,城市土地利用类型发生变化,城市下垫面的不透水性显著增加,降雨形成的地表径流所携带的污染物进入城市受纳水体导致水质恶化,降雨径流污染已被认为是城市水环境恶化的主要原因之一^[1-3]。与平原城市相比,山地城市

因地形起伏多变、坡度较陡、降雨峰值靠前、局部区域人口密度高的特点,使其产生的降雨径流具有强度大、冲刷能力强、污染负荷高等特点^[4-6],严重影响着城市受纳水体的水质。

降雨径流污染主要受自然地理因素和社会因素

基金项目:中国长江三峡集团有限公司自主科研项目(WWKY-2021-0475)

作者简介:陈亚松(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事水环境治理技术研究。E-mail:chen_yasong@ctg.com.cn

通信作者:李轶(1975—),男,教授,博士,主要从事水污染控制与水环境修复研究。E-mail:envly@hhu.edu.cn

影响,包括降雨特征、雨前干期、下垫面类型、人口规模、地区生产总值和产业结构等^[7-13]。其中社会影响因素主要与政策变化相关,政策变化会导致人口规模、地区生产总值和产业结构发生改变^[14],从而直接或间接地影响降雨径流污染,通过政策鼓励采用下沉式绿地、雨水花园等绿色基础设施,可以减少径流中的污染物含量^[15];通过城市规划和建设控制城市排水系统,也可以减少降雨径流污染^[16]。因此,解析不同政策条件下降雨径流污染变化,对于降雨径流污染控制和优化政策的制定与执行具有重要意义。目前有关降雨径流污染及其影响因素的研究主要集中在单次或多次降雨监测数据的案例分析方面,从长时间尺度上对城市政策、社会因素与降雨径流污染关系的研究较少,针对山地城市的研究尚未见报道。

重庆是我国典型的山地城市之一,地处长江上游和三峡库区腹心地带,围绕海绵城市建设已制定多项政策,降雨径流污染情况也逐渐得到改善。本文以重庆主城区为研究对象,在全面进行文献调研的基础上,从文献中筛选提取了2010—2021年降雨径流监测数据,进行降雨径流水质和污染物指标相关性的年际变化分析,明确降雨径流污染特征与政策之间的关系,进一步量化分析人口规模、技术创新、经济发展、产业结构4种社会因素对山地城市降雨径流综合水质的影响,为山地城市降雨径流污染控制的政策制定提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域概况

重庆市位于长江上游地区,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温16~18℃。重庆市年平均降水量较丰富,多年平均降水量1100mm,降水年内分布集中,汛期(5—9月)雨量占全年的70%~85%^[17]。重庆是西南片区典型的山地城市,地势沿山脉、河流起伏多变,路面坡度陡,地面径流系数大,在平原、丘陵、低山等起伏较小的局部区域人口密度大^[18]。文中有效数据监测点主要位于重庆主城区的渝中区、江北区、南岸区、沙坪坝区、大渡口区、渝北区6个城区(图1)。

1.2 数据来源

选取合适的降雨特征和径流水质指标,在中国知网数据库(CNKI)中通过专业检索“重庆”与“降雨”“径流”“水质”“城市非点源污染”“径流污染”或“暴雨污染”获取2010—2022年文献159篇;在Web of Science数据库中通过高级检索“Chongqing”

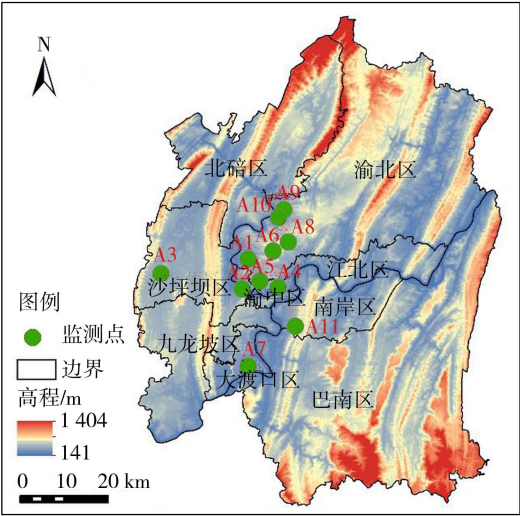


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

与“rainwater”“runoff”“water quality”“urban non-point source pollution”“runoff pollution”或“stormwater pollution”获取2010—2022年文献108篇。阅读文献后筛选能够提供降雨径流污染监测数据的文献24篇和2748份水质样本,监测时间为2010—2021年。进一步按照研究区域和下垫面类型进行权衡分析,确定监测区域为重庆主城区的17篇文献,按照采样点下垫面类型分为屋面和路面两种硬化下垫面。使用箱线图剔除水质数据中异常值,整理获取了重庆主城区2010—2021年的降雨径流监测数据,共计85场降雨事件、624个屋面径流监测样本、1584个路面径流监测样本,监测点分布见图1,监测数据见表1所示。

表1 监测数据

Table 1 Monitoring data

年份	降雨场次	样本数量		测点	数据来源
		屋面径流	路面径流		
2010	3		39	A1	张千千等 ^[19]
	2	10	20	A2	王书敏 ^[20]
	3		42	A1	郝丽岭 ^[21]
	3	28	42	A1	高勇 ^[22]
	8	32	64	A2~A4、A5	王书敏等 ^[23-24]
	2	16		A3	龙剑波等 ^[25]
	1		16	A1	郝丽岭等 ^[26]
2011	8	187	200	A1、A2	宋迁凤 ^[27]
	5	47	65	A1	郝丽岭 ^[21]
2013	5	24	60	A6	李骥 ^[28]
	5		40	A7	段丙政 ^[29]
2016	8	130	370	A8、A9	蒋荣廷 ^[30]
	4		128	A8	赵坤 ^[31]
2018	3		110	A9、A10	沈月 ^[32]
	3		37	A9、A10	Kong等 ^[33]
2019	15	150	120	A11	刘小霞 ^[34]
2021	7		231	A9、A10	吴攀 ^[35]

2 研究方法

2.1 内梅罗综合污染指数

内梅罗综合污染指数 I_p (以下简称“综合污染指数”)计算公式为

$$I_p = \sqrt{\frac{\left(\max \frac{\rho_i}{S_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{S_i}\right)^2}{2}} \quad (1)$$

式中: ρ_i 为第 i 项污染物指标的质量浓度; S_i 为第 i 项污染物指标评价标准; n 为污染物指标数。

污染物指标评价标准 S_i 根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》建立,并依据标准对水质污染类型划分为清洁、较清洁、污染、中度污染、重度污染五个等级^[36],如表 2 所示。以样本充分的固体悬浮物(SS)、COD、NH₃-N、TN、TP 作为评价因子,对不同下垫面的降雨径流综合水质进行评价, I_p 越小表示降雨径流水质越好。

表 2 污染物指标评价标准

Table 2 Pollutant indicator evaluation standard			
污染等级	$\rho_{SS}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{COD}}/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg/L})$
清洁	<10	<30	<1.5
较清洁	<10	30 ~ <50	1.5 ~ <5
污染	10 ~ <20	50 ~ <60	5 ~ <8
中度污染	20 ~ <30	60 ~ <100	8 ~ <25
重度污染	≥30	≥100	≥25
污染等级	$\rho_{\text{TN}}/(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{TP}}/(\text{mg/L})$	I_p
清洁	<1.5	<0.3	<0.95
较清洁	1.5 ~ <15	0.3 ~ <0.5	0.95 ~ <7.48
污染	15 ~ <20	0.5 ~ <1	7.48 ~ <10.07
中度污染	20 ~ <25	1 ~ <3	10.07 ~ <13.61
重度污染	≥25	≥3	≥13.61

2.2 相关性分析

皮尔逊(Pearson)相关系数 r 广泛用于度量两个变量之间的相关程度,其值介于 $[-1,1]$ 之间。 $|r|$ 越大,两个变量的相关程度越高; $|r|$ 越小,两个变量的相关程度越低。本文通过皮尔逊相关系数 r 分析污染物指标间的相关性,数据分析和结果图通过 Origin 软件完成。

2.3 对数平均迪式指数分解模型

采用对数平均迪式指数(logarithmic mean divisia index, LMDI)对重庆市主城区影响降雨径流综合水质变化的社会因素进行研究。根据郭政等^[37]研究可将 I_p 分解为

$$I_p = TSGP \quad (2)$$

其中 $S = V/D \quad G = D/P$

式中: T 为技术改善效应; S 为产业结构效应; G 为经

济发展效应; P 为城市人口规模效应,以研究区域常住人口总数表征; V 为研究区域工业增加值; D 为研究区域 GDP。

监测点分布的6个城区的常住人口总数、GDP、工业增加值数据(表 3)来自重庆市数据统计局^[38]。

表 3 研究区 2010—2019 年统计数据

Table 3 Statistical data of study area during 2010-2019			
年份	常住人口总数/万人	GDP/亿元	工业增加值/亿元
2010	475.36	2 466.0	912.9
2011	493.51	3 093.9	1 141.6
2013	519.60	3 730.8	1 383.7
2016	545.98	4 829.7	1 520.4
2019	569.54	6 390.6	1 223.0

利用 LMDI 分解模型^[39], I_p 从 $t-1$ 时期到 t 时期的变化量 ΔI_p 可以分解为

$$\Delta I_p = \Delta T + \Delta S + \Delta G + \Delta P \quad (3)$$

其中

$$\Delta T = L(I_{p,t}, I_{p,t-1}) \ln(T_t/T_{t-1})$$

$$\Delta S = L(I_{p,t}, I_{p,t-1}) \ln(S_t/S_{t-1})$$

$$\Delta G = L(I_{p,t}, I_{p,t-1}) \ln(G_t/G_{t-1})$$

$$\Delta P = L(I_{p,t}, I_{p,t-1}) \ln(P_t/P_{t-1})$$

$$L(I_{p,t}, I_{p,t-1}) = \begin{cases} \frac{I_{p,t} - I_{p,t-1}}{\ln I_{p,t} - \ln I_{p,t-1}} & I_{p,t} \neq I_{p,t-1} \\ I_{p,t} & I_{p,t} = I_{p,t-1} \neq 0 \end{cases}$$

式中: ΔT 为技术改善效应变化量; ΔS 为产业结构效应变化量; ΔG 为经济发展效应变化量; ΔP 为人口规模效应变化量; $I_{p,t}$ 为 t 时期的内梅罗综合污染指数; T_t 、 S_t 、 G_t 、 P_t 分别为 t 时期技术改善、产生结构、经济发展、人口规模效应值。若某个效应变化值为正值,则表示该因素效应值增加对降雨径流水质改善具有负向作用;反之,则表示该因素效应值增加对降雨径流水质改善具有正向作用。

3 结果与分析

3.1 降雨径流水质年际变化分析

采用 I_p 对重庆主城区路面和屋面降雨径流水质进行综合评价,在明确降雨径流水质整体变化的基础上,使用箱体图对 SS、COD、NH₃-N、TN、TP 质量浓度年际变化进行分析,结果如图 2、图 3 所示。

由图 2(a)可知,重庆主城区屋面径流水质发生显著变化, I_p 综合评价结果显示,屋面较多年份的降雨径流水质在“较清洁到污染”之间,其中2016 年 I_p 最大,为 27.28。由图 2(b) ~ (f)可知,屋面径流主要污染物指标为 SS、COD、TN,多年质量浓度均值分别为 156.20、76.87、4.84 mg/L。SS 质量浓度在 2016 年前上升,2016 年后下降;COD、NH₃-N 质量浓度均值分别在 2013、2011 年达到最大;TN 质量

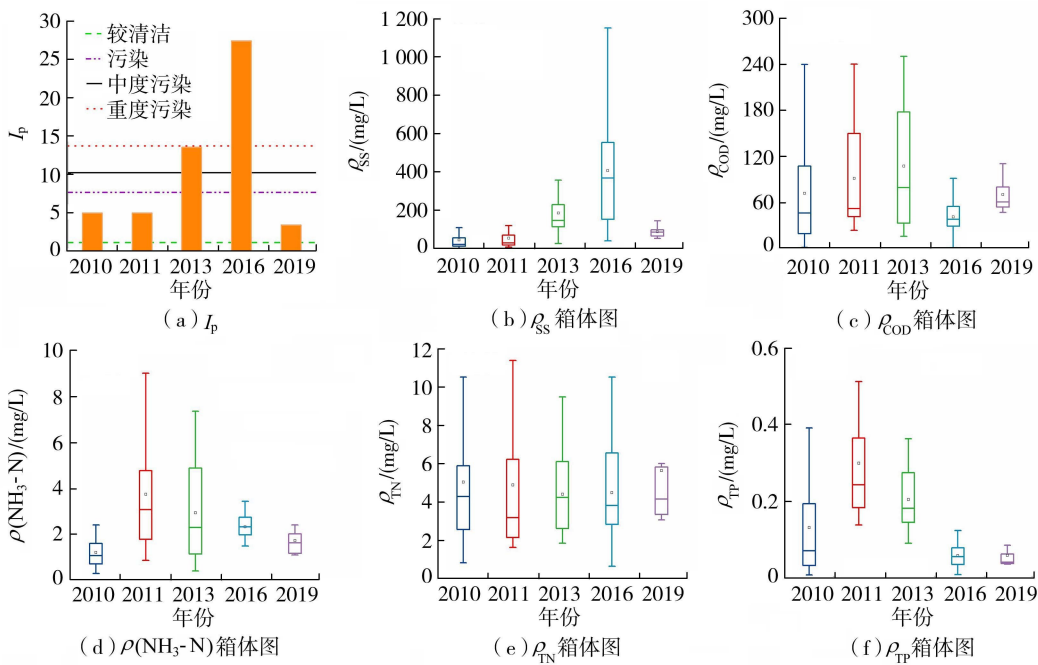


图2 屋面降雨径流综合污染指数及污染物指标质量浓度年际变化

Fig.2 Interannual variations of comprehensive pollution index and mass concentrations of pollutant indicators of roof runoff

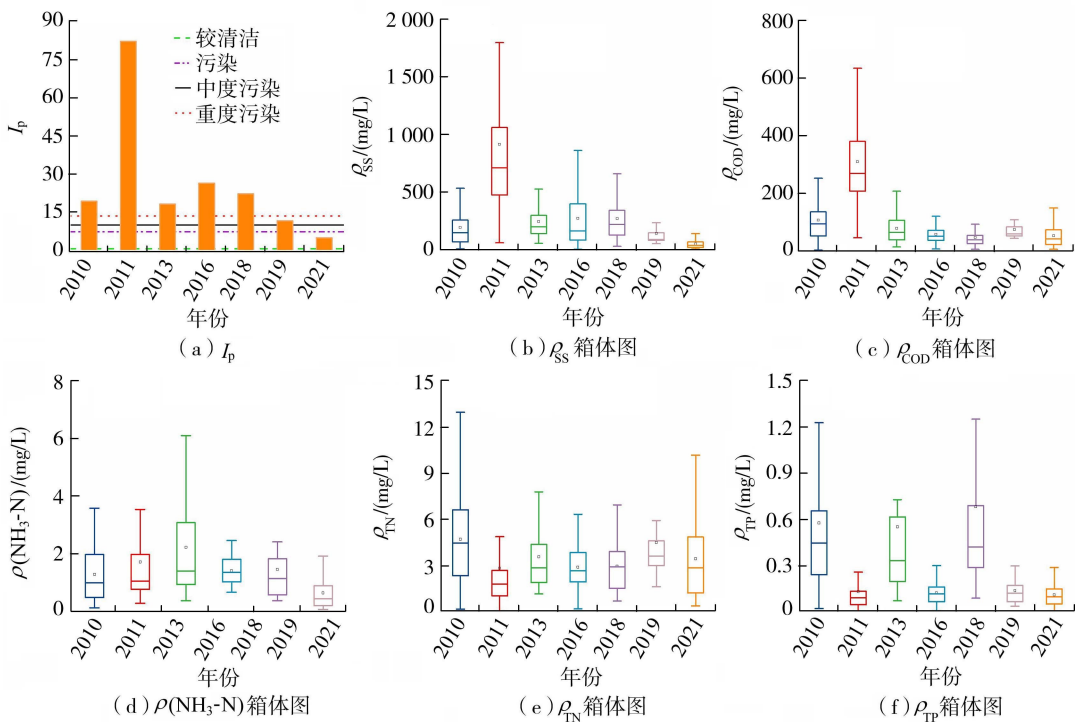


图3 路面降雨径流综合污染指数及污染物指标质量浓度年际变化

Fig.3 Interannual variations of comprehensive pollution index and mass concentrations of pollutant indicators of pavement runoff

浓度均值在 4.34 ~ 5.58 mg/L 范围内,TP 质量浓度均值在 0.036 ~ 0.30 mg/L 范围内,两者变化较小。进一步对污染较为严重的 2016 年进行分析,2016 年 SS 质量浓度明显增加,而 COD、NH₃-N 和 TP 质量浓度出现下降趋势,TN 质量浓度基本未发

生变化,这表明 2016 年屋面径流污染严重由 SS 增加导致。屋面径流污染中 SS 主要来源于大气沉降和初期冲刷,已有研究表明,2016 年重庆空气污染较为严重,空气中 PM_{2.5}、PM₁₀ 含量较高^[40-41],进一步验证了分析结果的正确性。2017 年和 2018 年

分别为“大气十条”五年行动计划的收官之年和“打赢蓝天保卫战”三年行动计划开局之年,重庆主城区的治理取得成效^[41],在空气质量改善后的2019年屋面降雨径流水质也得到改善,表明屋面降雨径流水质改善与空气质量改善具有一致性。

由图3(a)可知,重庆主城区路面污染较为严重,综合评价结果显示71.4%的年份 $I_p>13.61$,为重度污染,其中2011年 I_p 最大,为82.39,2016—2021年 I_p 呈现下降趋势,路面径流水质从“重度污染”提升到“较清洁到污染”之间,路面降雨径流水质逐渐得到改善。由图3(b)~(f)可知,路面径流中SS、COD和TN污染较为突出,多年质量浓度均值分别为301.87、107.37、3.58 mg/L。SS、COD质量浓度在2011年后逐渐减小,氮类污染物未发生明显变化,TP质量浓度较低(均值为0.11~0.68 mg/L)。进一步对污染严重的2011年进行分析,由图3可知,2011年与2010年相比,SS和COD质量浓度明显增加,质量浓度均值分别为915.32、313.39 mg/L,SS和COD污染严重。2016—2021年各污染物浓度均逐渐下降,路面径流水质得到改善。2016年和2018年重庆市人民政府办公厅分别发布了“关于推进海绵城市建设的实施意见”“关于印发重庆市海绵城市建设管理办法(试行)的通知”,以“水体不黑臭、小雨不给水、大雨不内涝、热岛有缓解”为目标,推进低影响开发工程的建设和管理,控制径流污染,并在2020年完成了42.1 km²海绵城

市建设试点^[42];2017年和2018年分别发布了“关于印发2017年大气污染防治重点工作目标任务分解的通知”、“重庆市空气重污染天气应急预案的通知”,这一系列倡议性和强制性措施的颁布和实施与降雨径流水质改善时间具有一致性,表明政策性管理措施的制定,改善了重庆主城区的空气质量 and 径流质量,一定程度上减轻了降雨通过大气和路面冲刷产生的污染,进而改善路面降雨径流污染现状。

3.2 降雨径流污染物指标相关性分析

采用重庆主城区2010—2021年降雨径流污染物瞬时浓度数据,对降雨径流污染物指标与SS和COD两种主要污染物的相关性变化情况进行分析。依据降雨径流水质综合评价和年际变化情况,选取降雨径流水质污染严重或变化较大的年份进行详细分析,结果如图4、图5所示(图中*和**分别表示相关性在0.05水平显著和0.01水平显著,×表示相关性结果不显著,无统计学意义)。

由图4可知,重庆主城区屋面径流各污染物指标与SS和COD的相关性逐渐增强,SS与COD的相关系数 r 由2010年的0.36增加到2019年的0.85;除2010年SS与NH₃-N、NH₃-N与TN的相关性不显著($p>0.05$),2011年SS与TN的相关性不显著($p>0.05$)之外,其余年份各污染物指标间均呈现显著相关性。山地城市因年降水量丰富,屋面排水坡度较陡,坡度增加使得降雨冲刷增强,各污染物指标间的相关性增加。在污染较为严重的2016年,

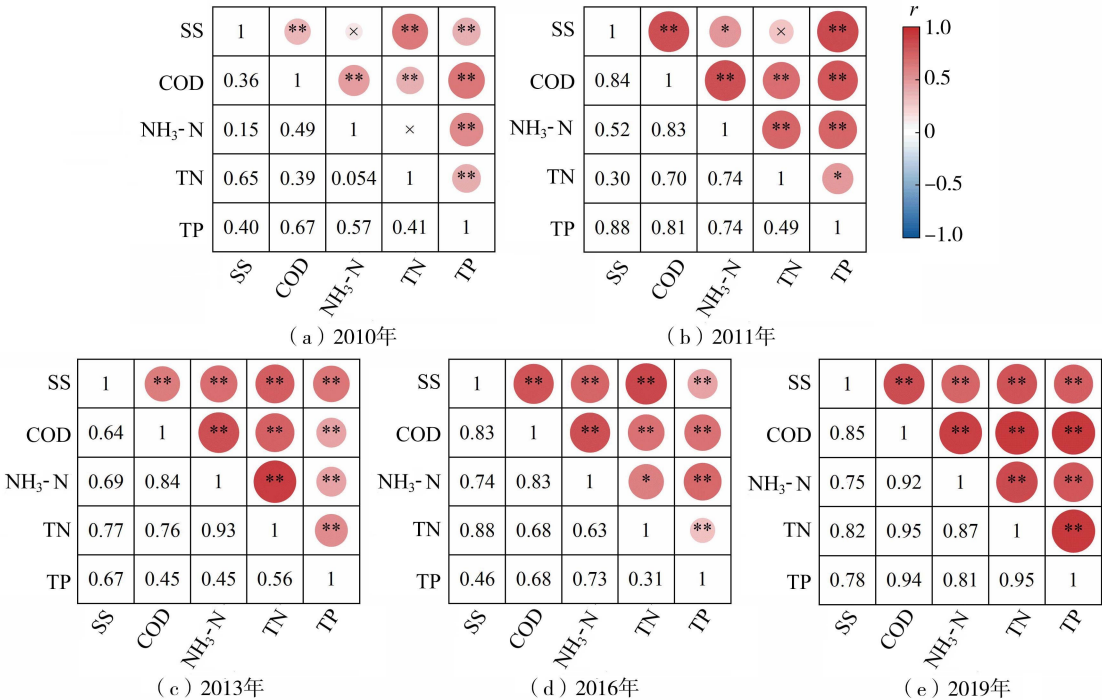


图4 屋面降雨径流污染物指标皮尔逊相关性

Fig.4 Pearson correlation of pollutant indicators of roof runoff

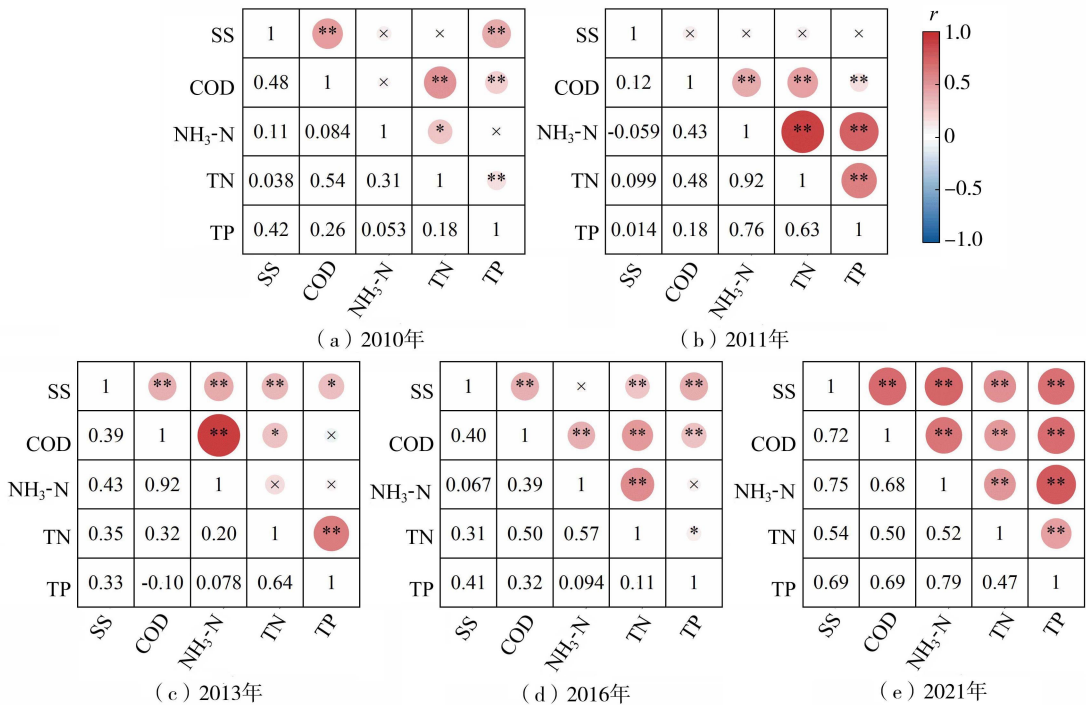


图5 路面降雨径流污染物指标皮尔逊相关性

Fig. 5 Pearson correlation of pollutant indicators of pavement runoff

污染物指标间的相关性较强且与其他年份未呈现显著差异,表明 SS 和其他年份污染物具有相似来源,经分析 2016 年空气 PM₁₀ 含量较高^[41],主要来源可能为降雨对大气沉降颗粒物和屋面材质的冲刷作用。

由图 5 可知,重庆主城区路面径流各污染物指标与 SS 和 COD 的相关性逐渐增强,SS 与 COD、SS 与 TP 的相关性较强,除 2011 年之外,均呈现显著相关,2010—2021 年相关系数 r 分别从 0.48、0.42 增加到 0.72、0.69。值得注意的是,在污染严重的 2011 年, ρ_{ss} 均值高于其他年份(图 3),且 SS 与各污染物指标均不相关,2021 年路面径流水质提升到“清洁与污染”之间时,各污染物指标间均呈现显著相关关系,这表明降雨径流水质的改善可增强 SS 与各污染物指标间的相关性,SS 与各污染物指标相关性增强后,可通过降低 ρ_{ss} 同步去除其他污染物,呈现正反馈关系。相关性分析也表明,研究期间路面径流水质变好,路面颗粒态污染物占比逐渐增加,主要原因是山地城市渗透性较差的岩石位于浅表地层或直接裸露的情况较为常见,产生的径流冲刷强度大,导致路面水质改善过程中径流颗粒态污染物占比增加。

3.3 降雨径流社会影响因素分析

采用 LMDI 分解模型探讨技术改善效应、产业结构效应、经济发展效应和人口规模效应对重庆主城区屋面和路面降雨径流综合污染指数变化量的影

响,结果如图 6 所示。总体来看,各研究时间段屋面和路面降雨径流综合污染指数变化量正负波动,其变化趋势与降雨径流水质变化(图 2、图 3)具有一致性。

从图 6 可见,技术改善效应对降雨径流水质影响较为显著。2016—2019 年技术改善效应对水质改善具有正向作用,这是由于其间重庆市人民政府办公厅颁布了一系列海绵城市建设管理办法,重庆市住房和城乡建设委员会也发布了“关于进一步加强城市排水管网工程建设质量管理工作的通知”,水污染防治措施的落实和降雨径流污染控制技术的提升使降雨径流水质得到改善。Wang 等^[43]研究也证明了有效污染控制技术(如在火电厂中应用脱氮措施)会对污染物排放产生显著影响。

产业结构效应在 2010—2011 年和 2011—2013 年对降雨径流综合污染指数变化的贡献值较小(−0.14 ~ 0.22),在 2013—2016 年和 2016—2019 年两个时间段内贡献值增大且均为负值,对屋面和路面降雨径流水质改善均具有正向作用。结合表 3 分析可知,2013—2016 年工业增加值与 GDP 之比仅减少了 6%,而路面降雨径流综合污染指数变化量由 2011—2013 年的正值转变为 2013—2016 年的负值,且变化较大,表明重庆主城区工业发展对降雨径流水质影响显著,通过产业结构升级,大力发展高新技术产业、第三产业等措施减少污染物排放,能够改善降雨径流水质。

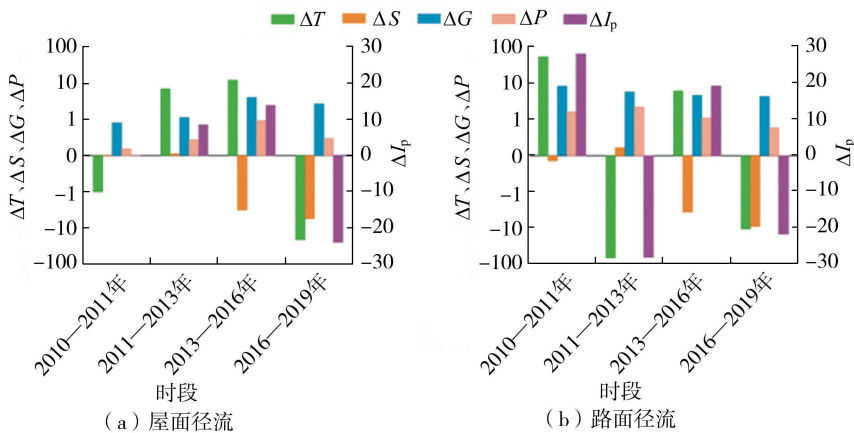


图6 2010—2019年水质变化影响因素分解

Fig. 6 Decomposition of influencing factors of water quality changes during 2010-2019

经济发展效应在整个研究时间段内对综合污染指标变化的贡献值较大且均为正值,对屋面和路面降雨径流水质改善具有负向作用,说明经济发展和人口增加与降雨径流水质改善存在一定矛盾^[44]。但在路面径流中其贡献值总体呈下降趋势,说明经济增长速度放缓,根据边际效益递减原则,其对水质影响将不断减小^[45]。这表明权衡生态效益和经济效益制定相关政策,对降雨径流改善和经济发展具有重要意义。

人口规模效应变化量在研究时间段内均为正值,人口增长对路面和屋面降雨径流水质改善呈现负向作用。结合表2分析可知,2013—2019年重庆主城区常住人口总数逐年稳定增加,人口规模效应对屋面降雨径流综合污染指数变化的贡献值在0~1之间,对路面降雨径流污染指数变化的贡献值在0.5~2.5之间,人口规模效应较为稳定,但人口增加所导致的环境压力仍不可忽视^[46]。

根据以上分析可知,技术改善效应对降雨径流水质影响占主导地位,在2016—2019年对降雨径流水质改善具有正向作用,这与降雨径流水质年际变化的分析结果一致;产业结构效应在2011—2013年对路面和屋面降雨径流水质改善呈负向作用,同时2011年屋面降雨径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP质量浓度均为峰值,表明重庆主城区工业发展对污染贡献突出,应通过调整产业结构减少工业产业污染;经济发展和人口规模效应对水质改善均呈现负向作用,在政策的影响下,经济水平提升会导致人口虹吸效应,经济发展水平和人口密度越高^[47],人类活动对降雨径流水质影响将越显著。

4 结论

a. 2010—2021年重庆主城区路面和屋面降雨径流主要污染物指标具有一致性,均为SS、COD和

TN。重庆主城区降雨径流水质整体呈现改善趋势,2019年屋面降雨径流水质和2021年路面降雨径流水质均提升到“较清洁与污染”之间。空气治理政策的有效实施,可减少污染物的大气干湿沉降,对屋面降雨径流污染改善效果显著;海绵城市和排水系统建设政策的有效实施,可以减少降雨径流中污染物的含量,对路面降雨径流污染控制效果显著。

b. 2010—2021年重庆主城区降雨径流各污染物指标间的相关性均呈现增强的趋势。2019年屋面降雨径流和2021年路面降雨径流中,SS与COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP均呈显著相关关系($p < 0.01$),屋面降雨径流中相关系数均大于0.75,路面降雨径流中相关系数均大于0.50。对于路面降雨径流,SS质量浓度降低后,其与各污染物之间的相关性显著增强,通过减少SS可以更好地实现对其他污染物的同步去除。

c. 各研究时间段,技术改善效应对降雨径流水质变化起主导作用,其次是产业结构效应,经济发展和人口规模效应对水质改善均呈现负向作用。为控制降雨径流污染,政府在制定政策和管理措施时,应注重推动降雨径流污染控制新技术发展和产业结构调整,以稳定和增强技术改善效应和产业结构效应对降雨径流水质的改善作用;同时综合协调经济发展与人口规模,将经济发展与生态保护相结合,减少经济发展效应和人口规模效应对降雨径流水质改善的负向作用,从根本上实现降雨径流污染控制。

参考文献:

- [1] 周宏,刘俊,丁华凯,等.城市有效不透水下垫面及其识别研究进展[J].水资源保护,2022,38(6):39-48. (ZHOU Hong, LIU Jun, DING Huakai, et al. Research progress on urban effective impervious surface and its identification[J]. Water Resources Protection, 2022, 38

- (6);39-48. (in Chinese))
- [2] 李勇,单雅洁,程浩,等.城市重污染河流沉积物营养盐和重金属分布及潜在生态风险[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):31-38. (LI Yong,SHAN Yajie, CHENG Hao, et al. Distribution and potential ecological risks of nutrient elements and heavy metals in sediments of a heavily polluted urban river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):31-38. (in Chinese))
- [3] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J].中国环境科学,2007,27(3):312-316. (LI Liqing, YIN Chengqing, HE Qingci, et al. Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang,Wuhan City to the receiving water[J]. China Environmental Science,2007,27(3):312-316. (in Chinese))
- [4] 王倩,张琼华,王晓昌.国内典型城市降雨径流初期累积特征分析[J].中国环境科学,2015,35(6):1719-1725. (WANG Qian, ZHANG Qionghua, WANG Xiaochang. Cumulative characteristics of runoff pollutants in typical domestic cities[J]. China Environmental Science,2015,35(6):1719-1725. (in Chinese))
- [5] 何梦男,陈诚,李港,等.基于元胞自动机的城市地表径流流向优化算法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):13-20. (HE Mengnan, CHEN Cheng, LI Gang, et al. Optimal algorithm for urban surface flow direction based on cellular automata[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):13-20. (in Chinese))
- [6] 俞玲.山地城市面源污染与雨洪调控集成技术的研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [7] 袁宏林,熊壮,张路明,等.降雨特征与地表径流和雨水管内径流污染物变化特征[J].安全与环境学报,2018,18(4):1593-1597. (YUAN Honglin, XIONG Zhuang, ZHANG Luming, et al. Analysis of the rainfall specific features, the surface rain-off and the network flow pollutants[J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(4):1593-1597. (in Chinese))
- [8] 孔燕,冯海涛,聂菊芬.抚仙湖流域城镇降雨径流污染特征及排放负荷研究[J].环境科学导刊,2018,37(5):26-32. (KONG Yan, FENG Haitao, NIE Jufen. Research on pollution characteristics and emission load of urban rainfall runoff in the Fuxian Lake Watershed, Yunnan[J]. Environmental Science Survey,2018,37(5):26-32. (in Chinese))
- [9] 于磊,黄瑞晶,李容,等.基于河道纳污能力的北运河城市副中心段合流制溢流污染控制研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):41-48. (YU Lei, HUANG Ruijing, LI Rong, et al. Research on pollution control of combined sewer overflow in Beijing municipal administrative center section of north canal based on the ability to decontamination of the river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):41-48. (in Chinese))
- [10] 江善虎,任明明,章二子,等.基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in source region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):1-7. (in Chinese))
- [11] 叶婷,石朋,钟华,等.基于 Budyko 假设和微分方程的淮河中游径流变化归因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):25-32. (in Chinese))
- [12] MÜLLER A, ÖSTERLUND H, MARSALEK J, et al. The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources[J]. Science of the Total Environment, 2019, 709: 136125.
- [13] HU Dexiu, ZHANG Cong, MA Bo, et al. The characteristics of rainfall runoff pollution and its driving factors in northwest semiarid region of China: a case study of Xi'an[J]. Science of the Total Environment, 2020, 726:138384.
- [14] 陈锡康,杨翠红,祝坤福,等.2022 年中国经济增长速度的预测分析与政策建议[J].中国科学院院刊,2022,37(1):68-77. (CHEN Xikang, YANG Cuihong, ZHU Kunfu, et al. Forecast of China's economic growth rate for 2022 and policy suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2022,37(1):68-77. (in Chinese))
- [15] 张湖川.海绵城市建设初期雨水径流污染特征及削减率研究[D].重庆:重庆理工大学,2019.
- [16] 熊子鹰.基于灰-绿设施耦合理念下的城市双排水系统构建研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [17] 胡庆芳,张建云,苏鑫,等.重庆中心城区洪涝灾害防御与韧性提升路径[J].中国水利,2023(14):15-23. (HU Qingfang, ZHANG Jianyun, SU Xin, et al. Flood and waterlogging control and the route of resilience promotion strategies for the central urban area of Chongqing[J]. China Water Resources,2023(14):15-23. (in Chinese))
- [18] 彭虹,黄攀攀,张万顺,等.重庆市农业用水量与农业经济发展脱钩程度的时空变化[J].水资源保护,2020,36(2):13-20. (PENG Hong, HUANG Panpan, ZHANG Wanshun, et al. Spatial-temporal change characteristics of decoupling between agricultural water consumption and agricultural economic development in Chongqing[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):13-20 (in

- Chinese))
- [19] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82. (ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, HAO Liling, et al. Characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff in Chongqing [J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 76-82. (in Chinese))
 - [20] 王书敏. 山地城市面源污染时空分布特征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
 - [21] 郝丽岭. 重庆城市居民区不同下垫面降雨径流污染及其控制研究[D]. 重庆:西南大学, 2012.
 - [22] 高勇. 山地城市居民区面源污染特征及其控制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
 - [23] 王书敏,何强,艾海男,等. 山地城市暴雨径流污染特性及控制对策[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5): 1445-1450. (WANG Shumin, HE Qiang, AI Hainan, et al. Characteristics and control of urban rainfall-runoff in mountainous city [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012(5): 1445-1450. (in Chinese))
 - [24] WANG Shumin, HE Qiang, AI Hainan, et al. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 502-510.
 - [25] 龙剑波,李兴扬,王书敏,等. 城市区域不同屋顶降雨径流水质特征[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2895-2900. (LONG Jianbo, LI Xingyang, WANG Shumin, et al. Water quality of stormwater runoff from different roofs in urban region [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2895-2900. (in Chinese))
 - [26] 郝丽岭,张千千,王效科,等. 重庆市不同材质路面径流污染特征分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1662-1669. (HAO Liling, ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, et al. Characteristics of runoff pollution on urban pavements with different materials in Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7): 1662-1669. (in Chinese))
 - [27] 宋迁凤. 重庆市某城区地表降雨径流污染特征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
 - [28] 李骥. 基于健康水循环的山地城市住区径流污染源头控制技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
 - [29] 段丙政. 重庆老城区面源污染及街尘清扫措施研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014.
 - [30] 蒋荣廷. 重庆市悦来新城典型下垫面雨水径流水质特性的初步研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
 - [31] 赵坤. 典型城市道路雨水径流污染特征研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
 - [32] 沈月. 山地城市雨水径流与污染物迁移转化规律研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
 - [33] KONG Zheng, SHAO Zhiyu, SHEN Yue, et al. Comprehensive evaluation of stormwater pollutants characteristics, purification process and environmental impact after low impact development practices[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123509.
 - [34] 刘小霞. LID 设施对校园区雨水径流污染的削减效应研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2020.
 - [35] 吴攀. 典型下垫面雨水径流颗粒污染物粒径分布特征研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2022.
 - [36] 刘子晨. 西安市主城区降雨径流污染源解析及影响因素研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
 - [37] 郭政,陈爽,董平,等. 长江三角洲城市群工业污染时空演化及其驱动因素[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1323-1335. (GUO Zheng, CHEN Shuang, DONG Ping, et al. Spatio-temporal evolution of industrial pollution in the Yangtze River Delta urban agglomeration and its driving factors [J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1323-1335. (in Chinese))
 - [38] 重庆市统计局. 重庆数据[EB/OL]. [2023-08-10]. <http://data.tjj.cq.gov.cn/cqtjjfbk/#/home>.
 - [39] ANG B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
 - [40] 蒲茜,李振亮,曹云擎,等. 重庆市 2015—2020 年秋冬季 PM_{2.5} 污染传输路径与潜在源贡献分析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(5): 49-59. (PU Xi, LI Zhenliang, CAO Yunqing, et al. Transport pathways and potential source contribution of PM_{2.5} pollution in Chongqing from 2015 to 2020 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(5): 49-59. (in Chinese))
 - [41] 何慧根,唐红玉,李永华,等. 2014—2018 年重庆主城区大气污染的特征及其与大气环流之间的关系[J]. 气象, 2021, 47(10): 1233-1245. (HE Huigen, TANG Hongyu, LI Yonghua, et al. Characteristics of air pollution and its relationship with atmospheric circulation in Chongqing City from 2014 to 2018 [J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(10): 1233-1245. (in Chinese))
 - [42] 重庆市住房和城乡建设委员会. 小雨不积水大雨不内涝重庆完成 42.1 平方公里“海绵城市”试点建设[EB/OL]. (2020-01-17) [2023-08-10]. http://zfcxjw.cq.gov.cn/zwxw_166/bmdt/bmdt_23631/202001/t20200117_5275299.html.
 - [43] WANG Like, WANG Yuan, HE He, et al. Driving force analysis of the nitrogen oxides intensity related to electricity sector in China based on the LMDI method[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118364.
 - [44] LI Wei, XI Yongqin, WU Feimei, et al. Green development performance of water resources and its economic-related determinants [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118048.

[19] 刘景春,严重玲,胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物(AVS)研究进展[J]. 生态学报,2004,24(4):812-818. (LIU Jingchun, YAN Chongling, HU Jun. A review on the studies of acid-volatile sulfide in aquatic sediments [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4):812-818. (in Chinese))

[20] TRUONG D T, FRANZOSA E A, TICKLE T L, et al. MetaPhlAn2 for enhanced metagenomic taxonomic profiling[J]. Nature Methods, 2015, 12(10):902-903.

[21] 熊旭梅,周雪,郭佳,等. 不同 pH 和氧气条件下土壤古菌与海洋古菌的竞争适应机制[J]. 土壤学报,2022,59(3):833-843. (XIONG Xumei, ZHOU Xue, GUO Jia, et al. Competitive adaptation mechanism of soil archaea and marine archaea under different pH and oxygen conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3):833-843. (in Chinese))

[22] 刘帅. 典型生境中氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)的微生物生态学研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[23] 段昌海,张翠景,孙艺华,等. 新型产甲烷古菌研究进展[J]. 微生物学报,2019,59(6):981-995. (DUAN Changhai, ZHANG Cuijing, SUN Yihua, et al. Recent advances on the novel methanogens [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(6):981-995. (in Chinese))

[24] 王洪臣,汪俊妍,刘秀红,等. 排水管道中硫酸盐还原菌与产甲烷菌的竞争与调控[J]. 环境工程学报,2018,12(7):1853-1864. (WANG Hongchen, WANG Junyan, LIU Xiuhong, et al. Competition and regulation of sulfate-reducing bacteria and methanogenic archaea in sewers [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(7):1853-1864. (in Chinese))

[25] 王皓,钱琪卉,丁瑞睿,等. 复合潜流人工湿地对农村生活污水的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. 安徽农业大学学报,2020,47(6):962-970. (WANG Hao, QIAN Qihui, DING Ruirui, et al. Performances of a hybrid horizontal subsurface-flow constructed wetland system treating on rural domestic sewage and its microbial community structure characteristics [J]. Journal of Anhui

Agricultural University, 2020, 47(6):962-970. (in Chinese))

[26] 夏国栋,朱四喜,赵伟,等. 复合垂直流人工湿地基质细菌群落结构变化特征[J]. 工业水处理,2022,42(11):113-121. (XIA Guodong, ZHU Sixi, ZHAO Wei, et al. Characterization of bacterial community variations in composite vertical flow constructed wetland substrates [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11):113-121. (in Chinese))

[27] 刘晔. 不同生态区稻田土壤微生物群落差异及深耕作用机制研究[D]. 郑州:河南农业大学,2022.

[28] YANG P, VAN ELSAS J D. Mechanisms and ecological implications of the movement of bacteria in soil [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 129:112-120.

[29] 李世卿,王先之,郭正刚,等. 短期放牧对青藏高原东北边缘高寒草甸土壤及微生物碳氮含量的影响[J]. 中国草地学报,2013,35(1):55-60. (LI Shiqing, WANG Xianzhi, GUO Zhenggang, et al. Effects of short-term grazing on C and N content in soil and soil microbe in alpine meadow in the north-eastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(1):55-60. (in Chinese))

[30] CASTRO H F, CLASSEN A T, AUSTIN E E, et al. Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(4):999-1007.

[31] 陈炎辉,陈明华,王果,等. 不同坡度地表径流中污泥氮素流失规律的研究[J]. 环境科学,2010,31(10):2423-2430. (CHEN Yanhui, CHEN Minghua, WANG Guo, et al. Effects of slopes on nitrogen transport along with runoff from sloping plots on a lateritic red soil amended with sewage sludge [J]. Environmental Science, 2010, 31(10):2423-2430. (in Chinese))

[32] YI Xinzhu, LIANG Jieliang, SU Jianqiang, et al. Globally distributed mining-impacted environments are underexplored hotspots of multidrug resistance genes [J]. The ISME Journal, 2022, 16(9):2099-2113.

(收稿日期:2023-06-26 编辑:施业)

(上接第 125 页)

[45] 文扬,马中,吴语晗,等. 京津冀及周边地区工业大气污染排放因素分解:基于 LMDI 模型分析[J]. 中国环境科学,2018,38(12):4730-4736. (WEN Yang, MA Zhong, WU Yuhan, et al. Factors decomposition of industrial air pollutant emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas based on LMDI model analysis [J]. China Environmental Science, 2018, 38(12):4730-4736. (in Chinese))

[46] 赵立新,吴迪. 生态压力人口研究:兼析中国人口与环境关系的地区差异[J]. 人口学刊,2015,37(6):25-36. (ZHAO Lixin, WU Di. A study on the ecological pressure

of population: concurrent analysis on the regional differences of the relationship between population and environment in China [J]. Population Journal, 2015, 37(6):25-36. (in Chinese))

[47] 张利国,冷浪平. 流动人口与经济发展:基于城市面板数据的实证研究[J]. 当代财经,2022(2):16-27. (ZHANG Guoli, LENG Langping. Floating population and economic development: an empirical research based on urban panel data [J]. Contemporary Finance & Economics, 2022(2):16-27. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-30 编辑:施业)