

1997 – 2017 年泰国蒙河流域水环境时空变化分析

田皓予¹, 佟玲¹, 余国安², Arika Bridhikitti³

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 玛希隆大学 北碧府校区跨学科研究学院 环境工程与灾害管理系, 泰国 71150)

摘要: 蒙河(Mun River)流域是泰国东北部重要农业区,也是湄公河主要支流。随着流域经济社会发展,流域水环境难以避免受到扰动,研究其时空变化特征对于该区域及湄公河中下游的水生态环境保护具有重要意义。基于泰国污染管制署1997–2017年水质监测数据,应用季节性Kendall检验法分析代表性水质指标含量的变化趋势,并采用水质指数(water quality index)法分析流域整体水环境的时空分异特征。结果表明:尽管蒙河流域水环境总体质量尚好,近20年来水质总体上无趋势性变化,但存在明显的年内季节性变化以及空间差异。各监测站点非汛期水质状况一般好于汛期,而流域下游水质往往好于上游。推测土壤侵蚀、养分淋溶和城镇化进程是影响流域水环境的重要因素。

关键词: 水环境; 时空变化; 季节性Kendall检验; 水质指数; 泰国蒙河流域

中图分类号:X824

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0030-09

Spatiotemporal variations of water environment of the Mun River in Thailand during 1997 to 2017

TIAN Haoyu¹, TONG Ling¹, YU Guoan², ARIKA Bridhikitti³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Department of Environmental Engineering and Disaster Management, School of Interdisciplinary Studies, Kanchanaburi Campus, Mahidol University, 71150, Thailand)

Abstract: The Mun River Basin is an important agricultural area in northeastern of Thailand and a major tributary of the Mekong River. With the economic and social development, the water environment of the basin has been disturbed, studying the spatiotemporal characteristics of water quality of the Mun River is hence of significance for the protection of the aquatic ecology of the basin and the lower and middle Mekong River. Based on the water quality monitoring data from the Pollution Control Department in Thailand from 1997 to 2017, the seasonal Kendall test method was used to analyze the temporal variation of representative water quality indicators. The water quality index (WQI) method was used to analyze the spatiotemporal characteristics of the water environment. The results indicate that the overall quality of the water environment in the Mun River Basin was good, and no trend has been detected for the water quality in the past two decades. Obvious spatial and temporal variations, however, exists. The water quality of each monitoring site in non-flood season was generally better than that in flood season, and the water quality in the lower reaches of the basin was often better than that in the upper reaches. It was speculated that soil erosion, nutrient leaching and urbanization were important factors affecting the water environment of the basin.

Key words: water environment; spatiotemporal variation; seasonal Kendall test; water quality index (WQI); Mun River Basin in Thailand

收稿日期:2019-07-10; 修回日期:2019-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41661144030,41561144012)

作者简介:田皓予(1996-),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,研究方向为水环境评价与管理研究。

通讯作者:余国安(1978-),男,安徽怀宁人,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向为河流地貌和河流综合管理研究。

1 研究背景

随着经济社会快速发展,地表水质退化作为全球环境问题之一,日益受到高度关注。土地利用是影响流域水质变化的重要人为驱动力。土地利用变化不仅影响流域水文过程^[1],还将引起水体营养盐、细菌、有毒有害物含量、溶解氧变化等化学响应^[2]。杨琴等^[3]通过 Spearman 相关分析发现淮河流域的水质情况与土地利用类型百分比有关。农业和城市用地的增加被认为是全球淡水生态系统营养和沉积物增加的最大贡献者之一^[4–5]。养分(P, N)的过度使用会影响河流水质。Turner 等^[6]研究表明,密集而广泛的耕作,特别是化肥的使用,对营养负荷有显著的影响。农业非点源污染导致氮磷营养物、农药等流入河流,引起水体富营养化,毒害物质含量增加,破坏水体环境,进一步影响人类生产生活甚至威胁人体健康^[7]。

农业种植、城市化进程和人口迅速增长是影响泰国地表水质的主要原因。泰国污染管制署(Pollution Control Department, Thailand, 简称PCD)自1994年起监测全国48条主要河流的水质,并将观测指标作为管理河流水环境的基线^[8–11]。

水质评价有很长的历史,早期的评价主要是定性描述水的感官特性,如颜色、气味和浑浊度。随着科学技术的不断发展以及研究的深入,对水体各项理化性质的认识更为深刻,进而出现了不同的水质评价方法。如单因子评价法^[12]、水污染指数法^[13–14]、水质标识指数法^[15]、模糊评价法^[16–17]、主成分分析^[18–19]和人工神经网络法^[20–22]等。

水质指数(Water quality index, 简称WQI)最初由Horton于1965年提出,1972年Brown小组开发了一种类似于Horton指数的新的WQI^[23]。后来许多科学家和专家对WQI进行了修改(如美国国家卫生基金会水质指数(NSFWQI)^[24]、加拿大环境部长理事会水质指数(CCMWQI)^[25]、俄勒冈水质指数(OWQI)^[26])。WQI的确定有一个标准的步骤,首先由行业专家、相关机构或政府部门从对水质有较大影响的因素(如氧含量、富营养化、健康方面、物理特性和溶解物质)中选取代表性指标;然后确定各指标的适合度曲线;最后根据各指标对当地水质影响程度进行加权聚合得到最终的WQI值。WQI法将大量的数据转化为一个有效反映整体水质状况的数值,为管理者和决策者提供了一种简单高效的了解水质状况的方法^[27–28]。

在“一带一路”大背景下,大湄公河次区域(GMS)水环境管理对话合作正成为“澜湄合作”的重要内容,其中,区域水环境分析评估作为水环境管理的基础日益受到关注。本研究结合蒙河干流1997–2017年水环境指标持续监测结果,分析蒙河流域代表性水质指标和整体水环境的时空分异特征,了解在人类活动影响下,水环境变化是否呈现趋势性特征,并尝试分析影响水环境时空变化的潜在原因,为改善蒙河流域水环境提供科学依据,并希冀对自然条件相近且以农业种植为主的大湄公河次区域的其他中小流域水环境管理有所借鉴。

2 研究区域概况

蒙河是湄公河最大支流,位于泰国东北部,大致位于北纬14°~16°,东经101°30′~105°30′之间,干流河长约800 km,流域面积约 $8.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,蒙河流域及其水质、水文站点分布见图1。

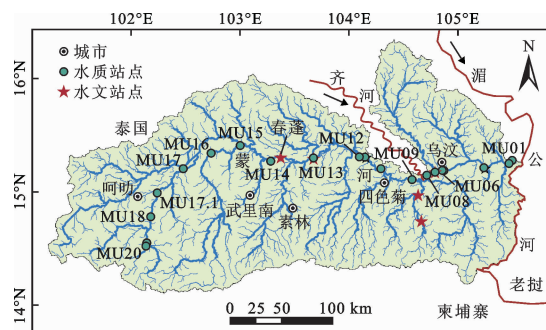


图1 蒙河流域及其水质监测和水文站点分布图

蒙河流域属亚热带湿润气候,受亚热带季风影响,流域干湿季气候差异分明,其河流水文过程(汛期和非汛期)的季节差异显著。流域内年平均温度不低于18℃,年降雨量为1300~1500 mm,降雨一般在5月中旬–10月中旬,主要降雨过程在8–9月,10月下旬至5月中旬降雨稀少,且2月中旬至5月中旬较为炎热^[29–30]。流域主要土壤类型为沙质壤土、壤质砂土等,结构较为松散,抗蚀力较低。这里是泰国重要的农业区,主要种植作物包括水稻、木薯、甘蔗等。

3 数据与方法

3.1 数据来源

泰国污染管制署(PCD)自20世纪90年代中期开始在蒙河流域布置水质站点,开展水质监测。目前,蒙河干流沿河分布21个水质监测站点(图1)。正常情况下,PCD每年在各监测站点进行4次水质

采样及测试,监测时间一般分别为 2 月(有时在 3 月)、5 月、8 月和 11 月下旬(有时在 12 月份或 1 月上旬),以反映和评估旱季(非汛期)和雨季(汛期)的河流水质状况。其中,8 月份的水质监测反映汛期水质状况,其他 3 个时间段的监测反映非汛期水质状况。本文基于 PCD 在 1997–2017 年间对蒙河水环境的持续监测数据,选择 8 个典型水质指标开展分析,包括溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD)、总大肠菌群(TCB)、粪大肠菌群(FCB)、总磷(TP)、硝态氮($\text{NO}_3\text{—N}$)、氨氮($\text{NH}_3\text{—N}$)和悬浮物(SS)。

3.2 分析方法

季节性 Kendall 检验是基于 Mann–Kendall 检验并在此基础上推广的一种单调趋势分析方法。该方法可以降低数据未检出、漏测以及奇异值对水质趋势的影响,且不存在丰水期与非丰水期水质资料不可比所带来的影响,所以在水质趋势分析中具有广泛的应用^[31]。在进行水质趋势分析时,数据序列的长短对检验结果有很大影响。过短的水质序列在趋势分析中的准确性得不到保证,而水质序列过长可能会导致趋势被掩盖。针对各研究区及监测数据的特点,不同学者选择不同的时间序列长度。其中 Chang^[32]使用了 8 a 的水质数据,Zhai 等^[33]使用了 12 a 的水质监测数据。本研究将 1997–2017 共 21 年的水质监测序列划分为两个时段(即 1997–2007 和 2008–2017)进行分析。该方法的原理是对于 n 年 p 月的水质监测资料,将每年相同月份的数据($x_{11}, \dots, x_{np}$)进行比较,计算比较结果之和 S :

$$S = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) \quad (1 \leq k < j \leq n) \quad (1)$$

p 月内可作比较的差值数据组个数 m 为:

$$m = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n |\text{sgn}(x_{ij} - x_{ik})| = \frac{n_i(n_i - 1)}{2} \quad (2)$$

在零假设下, p 月 S 的均值为: $E(S) = 0$

当 n_i 个水质序列非漏测值中有 t 个数相同时,方差为:

$$\text{Var}(S) = \sum_{i=1}^p \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18} - \sum_t \frac{t(t - 1)(2t + 5)}{18} \quad (3)$$

当 $n > 10$ 时, S 同样服从正态分布,其标准方差 Z 为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Kendall 检验统计量 τ 为:

$$\tau = \frac{S}{m} \quad (5)$$

若 τ 为正说明水质序列具有上升趋势, τ 为负说明具有下降趋势, τ 为零说明无变化趋势^[31]。一般情况下,取显著性水平 P 为 0.05 和 0.01,相应的标准方差 Z 值为 1.96 和 2.58。即 $|Z|$ 大于 2.58 说明具有高度显著变化趋势,介于 1.96 和 2.58 之间说明具有显著变化趋势,小于 1.96 无显著性。

利用 PCD 于 2006 年对代表性水质指标开发的适合度曲线,将各水质指标的观测平均值转换为子指标得分。为了得到适合度曲线,PCD 向泰国约 100 名水质专家发放了问卷,要求他们独立选择重要水质指标,并对所选指标的取值范围进行评分(从最差的 0 分到最好的 100 分)。PCD 利用这些建议为每个指标绘制适合度曲线。为更好地评估泰国河流的水质状况,使用泰国 45 条河流的 746 个采样站点的相关水质指标观测值进行为期一年的测试,然后做出相关调整,得到了最终的适合度曲线的评分公式^[34–36]。

本文采用非加权调和平方平均 WQI 的方法评估流域整体水环境的优劣。该方法被认为是对算术加权、几何加权以及非加权平均方法的改进^[37],其特点是侧重考虑超标严重的水质指标对整体水质评价结果的影响,并且认为不同的水质变量在不同的时间和地点对整体水质的影响是不同的^[26],其表达式如下:

$$WQI = \sqrt{\frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{SI_i^2}}} \quad (6)$$

式中: SI_i 为各水质指标对应的适合度曲线转换后的水质指标 i 的得分; i 为研究所选的水质指标(本文为 DO、BOD、TCB、FCB、TP、 $\text{NO}_3\text{—N}$ 、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 、SS); m 为所选水质指标的总数(本研究中 $m = 8$)。基于各个站点的 WQI 计算值,参考泰国国家环境局(National Environment Board, Thailand)^[38]划分的 5 类地表水特征及相应的 WQI 值范围(表 1)可对该站点的地表水水质进行分类。

考虑到水质监测站点 MU08 与 MU09 之间有大型支流齐河(Chi River)汇入,本文将 MU09 以上河

段(MU09 – MU20)作为一个整体,称为上游,MU08 以下(MU01 – MU08)为一个整体,称为下游。

4 结果与分析

4.1 主要水环境指标时空分异

对 1997 – 2017 年蒙河流域的 21 个水质监测站点的数据分析表明,主要水质指标含量具有显著的时空分异特征。选取 4 个典型监测站点(MU17、MU12、MU06、MU01)的代表性水质指标(DO、BOD、TP、NO₃—N)进行分析,结果见图 2。由图 2 可看

出,各指标含量在 1997 – 2017 年虽无明显增加或减小趋势,但随时间变化波动剧烈,且空间差异明显。基本上,上游 DO 含量较下游低,而 BOD、TP 含量较下游高。按照泰国地表水质标准^[38](泰国地表水质标准中无 TP 分类标准,参考中国《地表水环境质量标准(GB3838 – 2002)》中 TP 分类标准),上游 DO 含量主要为 3 ~ 4 级,下游为 2 ~ 3 级;上游 BOD 含量主要为 2 ~ 4 级,下游为 2 ~ 3 级;上游 TP 含量主要为 3 ~ 5 级,下游为 1 ~ 3 级;整个河段 NO₃—N 含量主要为 3 级及优于 3 级。

表 1 泰国 5 类地表水特征及相应 WQI 值范围

等级	类型	特征	WQI 值
I	很好	没有污染物污染;适用于(1)按正常消毒程序后可饮用;(2)生物的自然繁殖和生态系统的保护	>91
II	尚好	有一些污染物污染;适用(1)经常规水处理及消毒工序后饮用;(2)水生生物保护;(3)渔业;(4)游泳、水上运动和娱乐活动	71 ~ 90
III	一般	有一些污染物污染;适用于(1)经过常规水处理和消毒处理后使用;(2)农业	61 ~ 70
IV	差	有一些污染物污染;适用于(1)经过常规水处理和消毒处理后使用;(2)工业	31 ~ 60
V	非常差	有一些污染物污染;只适用于航行	<30

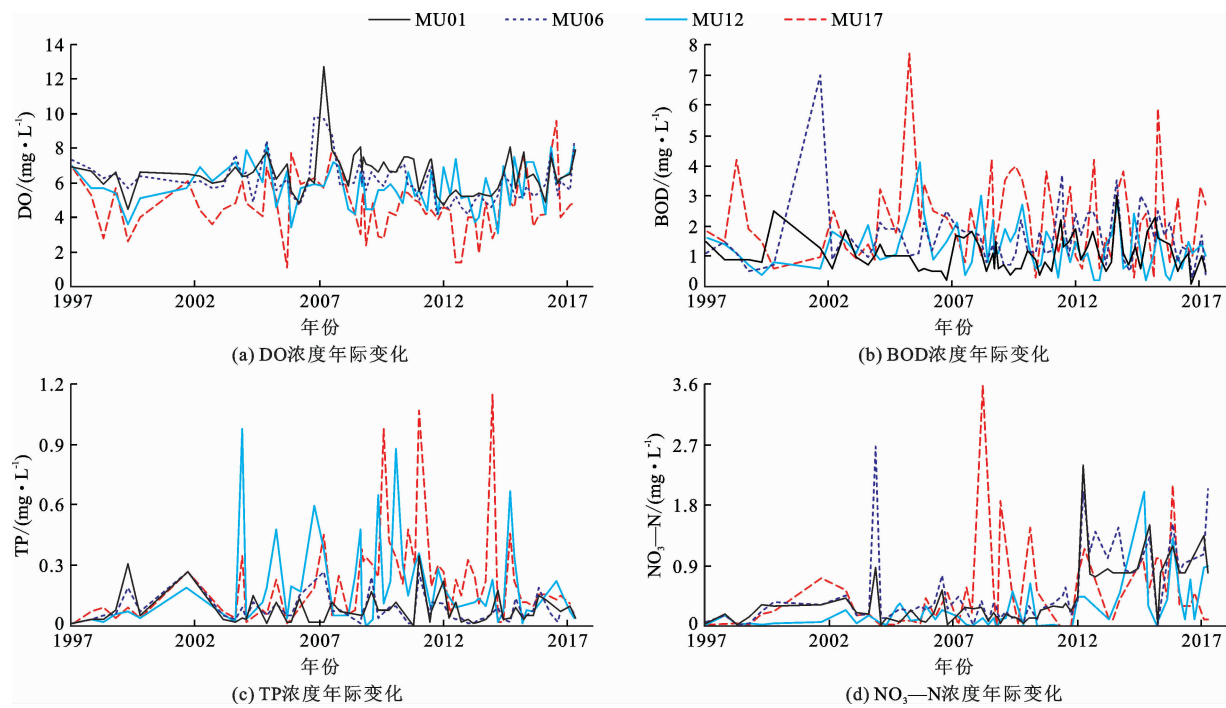


图 2 1997 – 2017 年蒙河 4 个监测站点代表性水质指标随时间变化

蒙河流域属于亚热带湿润气候,该地区汛期和非汛期降雨和径流差异十分显著,而汛期和非汛期河流水文过程(流量、流速)差异对河流水质有很大影响。利用季节性 Kendall 检验得到 1997 – 2007、2008 – 2017 年两个时段 18 个水质站点代表性水质指标的时间变化趋势,计算结果见表 2、3。

表 2、3 中季节性 Kendall 检验结果显示,两个分析时段 BOD、TCB、FCB、SS 含量变化趋势不同。1997 – 2007 年 TCB、FCB 含量呈显著上升趋势,而近 10 年(2008 – 2017)呈显著下降趋势。21 世纪初水体的主要污染来自粪大肠菌群的污染,高生化需氧量导致低溶解氧和高氨水平,近年来相关环境保

护部门大力控制水体中细菌类污染物含量,直到 2015 年蒙河水体 TCB 达标率为 96%,FCB 达标率为 99%。而 SS 含量由 1997—2007 年的几乎无显著变化到 2008—2017 年大部分水质站点呈下降趋势(特别是上游)反映了土地利用变化对于 SS 含量的影响。

蒙河上游与下游 DO、BOD 含量的趋势性变化具有明显的差异,对于大者为优的收益性指标 DO,上游河段呈上升趋势,且 2008—2017 时段较 1997—2007 时段的变化更为明显。

1997—2007 时段下游无显著变化趋势,但 2008—2017 时段大部分站点呈下降趋势。对于小者为优的成本性指标 BOD,上游除个别站点(MU16, MU17)在 2008—2017 时段有下降趋势外,大部分站点的 BOD 含量在两个分析时段(1997—2007;2008

—2017)未监测到显著趋势性变化,但下游多个站点监测结果表明 BOD 含量呈上升趋势。说明齐河(Chi River)的汇入对于蒙河水体中的溶解氧含量和生化需氧量有很大的影响。

对于氮类营养物含量($\text{NO}_3\text{—N}$ 、 $\text{NH}_3\text{—N}$)流域内大部分站点呈现显著上升趋势,特别是 2008—2017 年流域下游所有站点均呈显著上升趋势,可能是由于近些年来农药化肥的施用量增多导致蒙河下游水体中氮类营养物质含量呈现上升趋势,且由于人口增多,排入河流中的生活污水增加也会导致营养物质含量的升高。比如下游 MU06 站点附近是蒙河下游最大的城市乌汶(Ubon Ratchathani),近些年该城市规模扩大,人口增加,排入蒙河的生活污水量上升,而生活污水中通常含有大量的氮,该结果与流域实际情况吻合。

表 2 1997—2007 年 18 个站点代表性水质指标的季节性 Kendall 趋势检验

监测站点	DO	BOD	TCB	FCB	TP	$\text{NO}_3\text{—N}$	$\text{NH}_3\text{—N}$	SS
MU18				↑ *			↑ *	
MU17			↑ *	↑ *				
MU16			↑ *	↑ *				
MU15	↑ **						↑ *	
MU14								
MU13			↑ *					
MU12						↑ *		
MU11					↑ *			↑ *
MU10	↑ *		↑ *			↑ *		↑ *
MU09	↑ *							
MU08						↑ *	↑ *	
MU07		↑ *	↑ *		↑ *	↑ *		
MU06		↑ **	↑ *			↑ *	↑ *	
MU05		↑ *						
MU04		↑ *						
MU03			↑ *	↑ *				
MU02				↑ *				
MU01							↑ *	

注:↓和↑分别表示减小和增加趋势,*和**分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验。

对 1997—2017 年 4 个代表性水质指标按汛期和非汛期、上游和下游进行分析对比,结果见图 3。由图 3 可以看出,各代表性水质指标具有明显的时空分异特征。蒙河汛期的 DO 浓度低于非汛期,而 BOD、TP 和 $\text{NO}_3\text{—N}$ 浓度高于非汛期,这与其他河流汛期水质一般好于非汛期水质的情况有所不同,

表 3 2008—2017 年 18 个站点代表性水质指标的季节性 Kendall 趋势检验

监测站点	DO	BOD	TCB	FCB	TP	$\text{NO}_3\text{—N}$	$\text{NH}_3\text{—N}$	SS
MU18			↓ **	↑ *				↓ **
MU17		↑ *		↑ *	↑ *			↓ **
MU16	↑ *	↑ *						↑ *
MU15	↑ **		↑ *				↑ *	↓ **
MU14	↑ *							↓ **
MU13	↑ **							
MU12	↑ *			↑ *			↑ *	
MU11	↑ **					↑ *	↑ *	↑ *
MU10	↑ **							
MU09								↓ **
MU08	↑ *	↑ *				↑ *	↑ *	↑ *
MU07	↑ *		↑ *	↑ *		↑ **	↑ *	
MU06				↓ **		↑ **	↑ **	
MU05	↑ *			↑ *		↑ **	↑ **	
MU04		↑ *	↓ **	↓ **		↑ **	↑ **	
MU03	↑ *			↓ **		↑ **	↑ *	
MU02	↑ *					↑ *	↑ *	
MU01				↑ *		↑ **	↑ **	

注:↓和↑分别表示减小和增加趋势,*和**分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验。

可能与蒙河流域主要为农业种植区且降雨集中有关,蒙河的沙质壤土和壤质砂土在汛期强降雨时易受侵蚀,土壤养分淋溶导致汛期营养物质进入水体。在空间分布上,蒙河上游 DO 浓度低于下游,而 BOD、TP 浓度高于下游。

为进一步探究代表性水质指标的空间变化,对

1997-2017年蒙河干流河段21个水质监测站点监测数据进行分析,结果见图4。由图4上看,流域水体的DO浓度呈下游向上游递减趋势,而BOD、TP浓度则呈下游向上游递增趋势,且TP浓度在MU08以下和MU09以上差异明显,可能是由于齐河(Chi River)汇入的影响。 $\text{NO}_3\text{—N}$ 的空间变化则具有季节性差异,在汛期一般上游河段含量较高,而在非汛期通常下游河段含量较高。可能原因是上游主要为农业种植区,汛期正值庄稼生长季,化肥施用成为 $\text{NO}_3\text{—N}$ 浓度高的主要因素,而下游城市乡镇较多,非汛期生活污水的排入成为河流中 $\text{NO}_3\text{—N}$ 浓度高的主要原因。

4.2 整体水环境时空变化

4个典型站点(MU01、MU06; MU12、MU17)WQI值计算结果显示,1997-2017年蒙河WQI值波动剧烈。不过,仅MU01站点的WQI值年际变化在0.01的显著性水平上有减小趋势,其他3个站点没有显著的趋势性变化。4个站点的WQI值在年内均表现出显著的季节性差异,与非汛期相比,汛期的WQI值通常较低(图5),说明蒙河流域汛期的水质较非汛期差。通过五类地表水对应的WQI值范围(表1)可以看出非汛期蒙河流域水质基本处于Ⅲ类或优于Ⅲ类(特别是下游)。

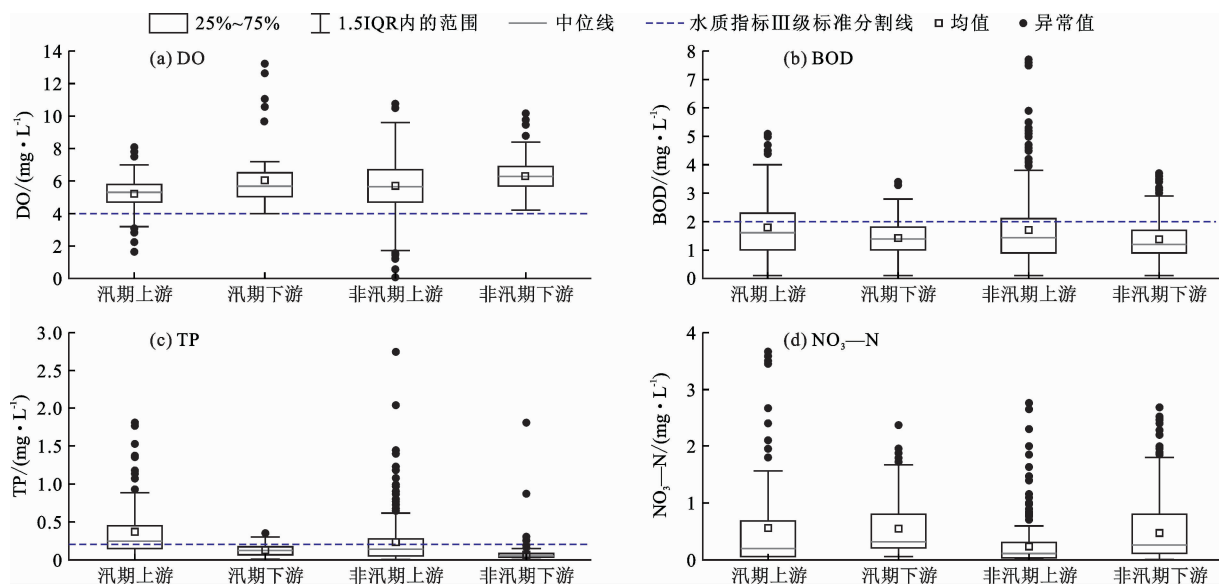
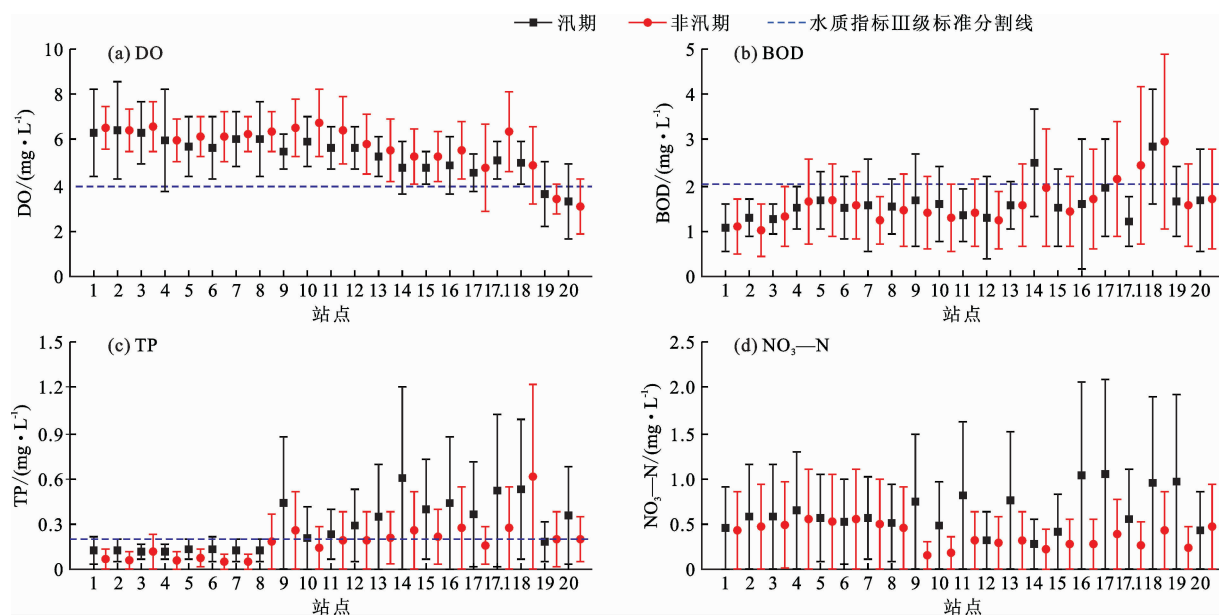


图3 1997-2017年蒙河代表性水质指标浓度上下游、汛期非汛期对比



注:图中横坐标1~20分别代表水质站点 MU01~MU20

图4 1997-2017年蒙河干流各水质站点代表性水质指标汛期和非汛期平均浓度

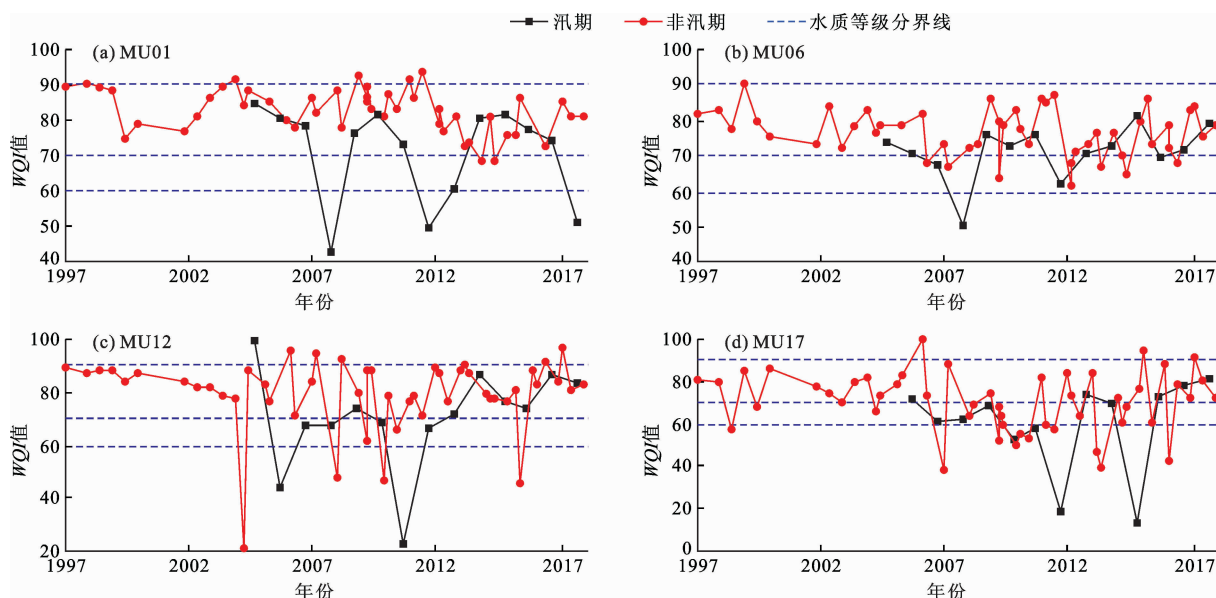


图5 1997–2017年蒙河干流4个典型站点汛期非汛期WQI值变化对比

与单项水质指标相似,1997–2017年蒙河不同站点多年平均WQI值也具有显著的空间差异(图6)。蒙河下游WQI值通常较高,说明下游水质好于上游。

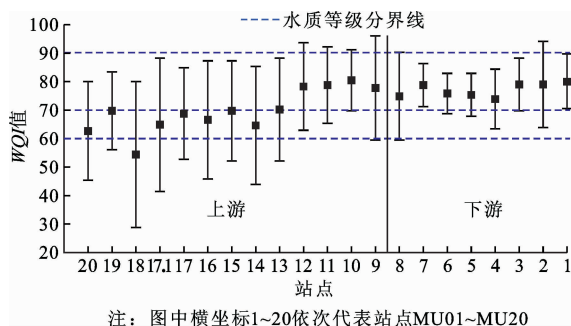


图6 1997–2017年蒙河多年平均WQI值空间变化

4.3 蒙河水环境时空分异特征形成原因初步分析

1997–2017年蒙河下游 $\text{NO}_3\text{—N}$ 含量明显增加,这可能与蒙河的水文气象条件、土壤物理属性以及下游城镇规模扩大有关,随着人口不断增多,生活污水成为蒙河 $\text{NO}_3\text{—N}$ 含量增加的主要原因。

蒙河流域年降水量变化较大,最大年降水量在1549.9~2194.0 mm之间,最小年降水量在604.9~999.4 mm之间,汛期降水量约占全年降水总量的92%~98%。且降水分布不均匀,年降水量空间分布表现为由上游向下游梯次增加。图7展示了蒙河上游春蓬(Chumphon)和下游乌汶(Ubon)两个水文站1980–2014年汛期(6–10月)和非汛期(11–次年5月)平均流量的变化。由图7可知,蒙河流域径流过程波动剧烈,但并没有显著的趋势性变化。径流量变化过程存在明显的年内季节性变化和空间差异。春蓬站多年汛期平均流量为 $99.62 \text{ m}^3/\text{s}$,是非汛期 $42.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 的2.4倍,乌汶站多年汛期平均流量为 $1140.80 \text{ m}^3/\text{s}$,是非汛期 $282.40 \text{ m}^3/\text{s}$ 的4倍。流域上下游径流量差异显著,同一年份同一时期乌汶站与春蓬站平均流量之比最高为33:1,这主要是由于春蓬站位于上游海拔较高,乌汶站位于下游海拔较低且汇集了更多的支流,加之降雨的影响使得径流量呈现该种时空分异特点。

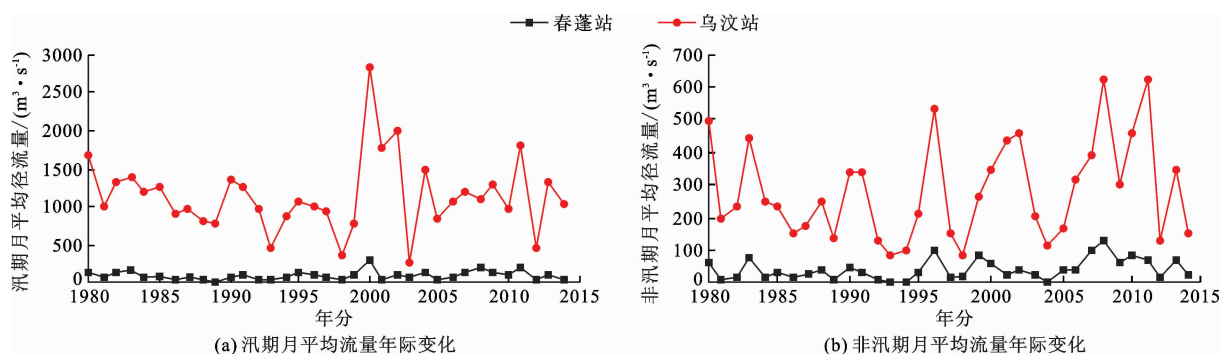


图7 1980–2014年春蓬、乌汶水文站汛期、非汛期月平均径流量变化

一般情形下,在点源、面源入河排污量相对一定时,河流水质的优劣与径流量相关性较强,其汛期水质优于非汛期,(如我国长江流域枯/平水期总磷污染较重,丰水期污染较轻^[39]),因为汛期流量大,有助于稀释和降低污染物浓度。但蒙河情况有所不同,其非汛期水质往往优于汛期,其原因一方面与流域所处地域的气候环境有关,蒙河流域干湿季分明,全年降雨主要集中在雨季(8-10月),非汛期降雨稀少且气温高、蒸发强烈,造成部分小支流、塘圩同干流的联系暂时中断,部分营养物(如磷、氮)蓄积在支流和塘圩中。进入雨季后,小支流和塘圩与干流重新联通,蓄积的污染物随支流汇入干流,导致干流汛期的营养物含量高于非汛期。雨季正值作物生长旺盛阶段,农药化肥的施用也是导致水体营养物质等污染物浓度含量高的原因。另一方面,蒙河流域的水质变化也与该流域的土壤结构有关,蒙河主要土壤类型包括沙质壤土、砂土、壤质砂土,通常透水能力较强而抗蚀能力较弱,汛期强降雨条件下,土体中细颗粒泥沙和营养物易被冲刷、淋溶进入水体,导致汛期水体中营养物和悬浮物含量高于非汛期。

5 结 论

本文以泰国东北部蒙河流域为例,基于季节性Kendall法和水质指数(WQI)法分析了蒙河流域1997-2017年沿干流21个水质监测站点代表性水质指标的时空变化,并评估流域整体水环境时空分异特征。研究结果表明:

(1) 蒙河水质总体尚好,大部分为Ⅲ类或优于Ⅲ类。1997-2017年蒙河水质在时间上波动剧烈,总体上无明显趋势性变化,但存在明显的年内季节性变化。与非汛期(2、5、11月)相比,汛期(8月)DO含量较低,BOD、TP、NO₃-N含量较高,WQI值通常最低,说明汛期水质情况较差。

(2) 蒙河代表性水质指标含量及整体水环境存在显著的空间差异。近10年来上下游DO、BOD含量存在相反的变化趋势,下游NO₃-N、NH₃-N含量呈现显著的上升趋势,但始终都低于地表水Ⅲ类标准限值。与下游相比,上游DO含量较低,BOD含量较高,上游TP含量是下游的3~5倍。下游水体WQI值较高,水质类别主要为Ⅱ类;上游WQI值较低,主要为Ⅲ类水,说明下游水质好于上游。

(3) 蒙河流域是泰国重要的农业区,农业种植(尤其水稻种植)中化肥和农药的施用不可避免地影响流域水环境。由于蒙河流域上游有大面积的农

业种植区,其土壤侵蚀及营养物淋溶是造成上游水质相对下游水质较差的重要原因,应控制化肥农药过度施用和城镇生活污水直接排放。

参考文献:

- [1] IERODIACONOU D, LAURENSEN L, MARCLEBLANC. The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in south-west Victoria, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, 74(4):305-316.
- [2] 范俊韬,张依章,张远,等. 流域土地利用变化的水生态响应研究[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7):981-990.
- [3] 杨琴,汤秋鸿,张永勇. 淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的关系[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(9):1519-1530.
- [4] HUANG Zhilin, HAN Liyang, ZENG Lixiong, et al. Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4):3943-3955.
- [5] URIARTE M, YACKULIC C B, LIM Y, et al. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(8):1151-1164.
- [6] TURNER R C, LINDSAY H A. Gender differences in cognitive and noncognitive factors related to achievement in organic chemistry[J]. *Journal of Chemical Education*, 2003, 80(5):563-568.
- [7] 张辉. 洱海流域农业发展的水环境效应[D]. 武汉:华中师范大学, 2016.
- [8] DAVID D. Endangered ecosystems: a review of the conservation status of tropical Asian rivers[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 248(3):167-191.
- [9] KRUAUWAL K, SACHER F, WERNER A, et al. Chemical water quality in Thailand and its impacts on the drinking water production in Thailand[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 340(1-3):57-70.
- [10] SCHAFFNER M, BADER H P, SCHEIDEGGER R. Modeling the contribution of point sources and non-point sources to Thachin River water pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(17):4902-4915.
- [11] THANAPAKPAWIN P, RICHEY J, THOMAS D, et al. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem River Basin, NW Thailand[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 334(1-2):215-230.
- [12] 罗芳,伍国荣,王冲,等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(5):87-89.

- [13] 刘琰,郑丙辉,付青,等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J]. 中国环境监测,2013,29(3):49-55.
- [14] 景朝霞,夏军,张翔,等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究,2019,32(1):104-115.
- [15] 胡成,苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报,2011,20(1):186-192.
- [16] 崔嘉宇,张宁红,郁建桥,等. 改进的模糊评价法在太湖水质评价中的应用[J]. 环境工程学报,2015,9(11):5357-5363.
- [17] 曾永,樊引琴,王丽伟,等. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J]. 人民黄河,2007,29(2):45-65.
- [18] 李国华,李畅游,史小红,等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. 水土保持通报,2018,38(6):310-314+321.
- [19] 郑倩玉,刘硕,万鲁河,等. 松花江哈尔滨段水环境质量评价及污染源解析[J]. 环境科学研究,2018,31(3):507-513.
- [20] 苏彩红,向娜,陈广义,等. 基于人工蜂群算法与BP神经网络的水质评价模型[J]. 环境工程学报,2012,6(2):699-704.
- [21] KHALIL B M, AWADALLAH A G, KARAMAN H, et al. Application of artificial neural networks for the prediction of water quality variables in the Nile Delta[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2012, 4(6):388-394.
- [22] HORE A, DUTTA S, DATTA S, et al. Application of an artificial neural network in wastewater quality monitoring: prediction of water quality index[J]. International Journal of Nuclear Desalination, 2008, 3(2):160-174.
- [23] 刘玲花,吴雷祥,吴佳鹏,等. 国外地表水水质指数评价法综述[J]. 水资源保护,2016,32(1):86-90.
- [24] LUMB A, BIBEAULT J F, KLAUNN P. A comparative study of USA and Canadian water quality index models[J]. Water Quality Exposure & Health, 2011, 3(3-4):203-216.
- [25] LUMB A, HALLIWELL D, SHARMA T. Application of CCME water quality index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 113(1-3):411-429.
- [26] CUDE C G. Oregon water quality index a tool for evaluating water management effectiveness[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(1):125-137.
- [27] BORDALO A A, NILSUMRANCHIT W, CHALERMWAT K. Water quality and uses of the Bangpakong River (Eastern Thailand)[J]. Water Research, 2001, 35(15):3635-3642.
- [28] TYAGI S, SHARMA B, SINGH P, et al. Water quality assessment in terms of water quality index[J]. American Journal of Water Resources, 2013, 1(3):34-38.
- [29] PRABNAKORN S, MASKEY S, SURYADI F X, et al. Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand[J]. Science of The Total Environment, 2018, 621:108-119.
- [30] ZHAO Zhonghe, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, et al. Studies on the spatiotemporal variability of river water quality and its relationships with soil and precipitation: A case study of the Mun River Basin in Thailand[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11):2466.
- [31] 胡国华,唐忠旺,肖翔群. 季节性 Kendall 检验及其在三门峡水库水质趋势分析中的应用[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(3):86-88.
- [32] CHANG H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River Basin, South Korea[J]. Water Research, 2008, 42(13):3285-3304.
- [33] ZHAI Xiaoyan, XIA Jun, ZHANG Yongyong. Water quality variation in the highly disturbed Huai River Basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses[J]. Science of the Total Environment, 2014, 496:594-606.
- [34] SINGKARAN N, YENPIEM A, SASITORN P. Determining water conditions in the northeastern rivers of Thailand using time series and water quality index models[J]. Journal of Sustainable Energy & Environment, 2010, 1:47-58.
- [35] Water Quality Management Bureau, Pollution Control Department. General water quality index[R]. Bangkok, Thailand,2004.
- [36] SINGKARAN N. Determining overall water quality related to anthropogenic influences across freshwater systems of Thailand[J]. International Journal of Water Resources Development, 2017, 33(1):132-151.
- [37] DOJLIDO J, RANISZEWSK J, WOYCIECHOWAKA J. Water quality index applied to rivers in the Vistula River basin in Poland[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 33:33-42.
- [38] National Environment Board. Notification No. 8: Surface water quality standard[R]. The 1992 Thailand Enhancement and Conservation of National Environmental Quality act (in Thai) Royal Thai Government Gazette, 1994.
- [39] 秦延文,马迎群,王丽婧,等. 长江流域总磷污染:分布特征·来源解析·控制对策[J]. 环境科学研究,2018,31(1):9-14.