喀斯特地区平水期水质污染综合分析
——以贵州省白云岩喀斯特世界自然遗产地为例

张尘月，刘子琦，刘肇军，李 渊，邢 锴

（贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心，贵州 贵阳 55 001）

摘 要：[目的] 对贵州省施秉县的白云岩喀斯特遗产地的河流水质污染状况进行分析，以期掌握遗产地水质污染原因，更好地保护白云岩喀斯特遗产地的河流与环境。[方法] 于 2017 年 10 月和 2018 年 4 月对遗产地境内黄洲河流域的 8 个代表性样点进行采样，对 TP，TN，NH_3-N，COD_{Mn}，DO，Chl-a 等指标进行测定与分析，并运用单因素评价法、均值型指数综合评价法以及多元统计分析法分析评价。[结果] ①遗产地缓冲区水质总体符合国家地表水Ⅲ类水标准，核心区水质部分不满足国家Ⅰ类水标准，主要污染物为总氮。②黄洲河流域春、秋季平水期水质状况相差不大，总体秋季较好，水体有较强的自净能力。③主要污染源为生活污水、固体垃圾以及农业面源污染。[结论] 对施秉白云岩喀斯特遗产地进行环境保护和流域水质综合管理时应注意减少氮、磷肥料的长期大量使用，防止生活污水、生活垃圾的随意排放与丢弃。

关键词：白云岩；遗产地；平水期；水质污染分析；多元统计分析

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0253-07 **中图分类号**：K903

文献参数：张尘月，刘子琦，刘肇军，等.喀斯特地区平水期水质污染综合分析[J].水土保持通报，2019，39(2)：253-259. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.040. Zhang Chenyue, Liu Ziqi, Liu Zhaojun, et al. Comprehensive analysis of water pollution in karst areas during nomal water season[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 253-259.

Comprehensive Analysis of Water Pollution in Karst Areas During Nomal Water Season
—Taking Dolomite Karst World Natural Heritage Site in Guizhou Province as an Example

Zhang Chenyue, Liu Ziqi, Liu Zhaojun, Li Yuan, Xing Kai

(*Guizhou Normal University Karst Research Institute, National Karst Rocky Desertification Control Engineering Technology Research Center, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*)

Abstract: [Objective] Water quality pollution of the karst heritage site in Shibing County, Guizhou Province was studied in order to understand the causes of water pollution and to protect the river and environment of the karst heritage site. [Methods] In October 2017 and April 2018, the Huangzhou River basin in the heritage site sampling 8 representative samples of TP, TN, NH_3-N, CODMn, DO, Chl-a and other indicators for the determination and analysis, and the use of single-factor evaluation method, The mean-value index comprehensive evaluation method and multivariate statistical analysis method were used. [Results] ① Heritage site buffer overall water quality meet the national surface water class Ⅲ of the water standard, the core part water quality does not meet the national class Ⅰ water standard, main pollutants for total nitrogen. ② The water quality of the Huangzhou River basin in spring and autumn has little difference, and the water quality is better in autumn as a whole, and the water body has a strong self-purification capacity. ③ The main pollution sources are domestic sewage, solid waste and agricultural surface source pollution. [Conclusion] The environmental protection and comprehensive management of watershed water quality in Shibing dolomite

收稿日期：2018-08-14 **修回日期**：2018-09-19

资助项目：国家十三五重点研发计划课题“喀斯特高原山地石漠化综合治理与山地旅游产业技术与示范”(2016YFC0502606)；贵州省地理学会向贵州师范大学委托项目；贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7775 号)

第一作者：张尘月(1994—)，女(汉族)，河北省唐山市人，硕士研究生，研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。E-mail：359257584@qq.com。

通讯作者：刘子琦(1979—)，女(汉族)，贵州省贵阳市人，博士，副教授，主要从事自然地理、喀斯特地貌与洞穴、石漠化综合治理与喀斯特环境演变方面的研究。E-mail：124294329@qq.com。

karst heritage site should be paid attention to, which are to reduce the long-term use of nitrogen and phosphorus fertilizers, to prevent the free discharge and discard of domestic sewage and domestic waste.

Keywords: dolomite; legacy area; horizontal period; analysis of water pollution; multivariate statistics

喀斯特地区是典型的生态环境脆弱区,其脆弱性表现为生态系统变异敏感度高,灾变承受能力低,环境容量小[1]。中国西南喀斯特地区是世界上最大的喀斯特集中连片分布带[2],面积约 5.50×10^5 km^2,占全国喀斯特面积的 15.97%[3],其中贵州施秉发育着世界上古老、保存完整的质纯白云岩喀斯特[4],世界遗产委员会评价它是"白云岩喀斯特的典型范例[5]。施秉白云岩喀斯特在全球具有唯一性,对其生态环境的保护尤为重要。喀斯特地区贫困人口集中,人地矛盾尖锐,致使生态环境遭到破坏,出现了一系列的生态环境问题[6],主要集中体现在植被退化、水土流失及水环境污染方面[7-9]。保护水资源,成为喀斯特地区环境保护的主要目标之一[10]。

对水环境的保护与治理,首先要对其水环境质量现状、污染特征进行分析评价,确定污染源[11-12]。通过阅读文献发现,关于水质评价学者们采用的方法较多且并不统一[13-17],但国内外学者[18-22]统一认为通过多元统计分析可以更全面和精确地反映研究区的通过水质状况,进而分析其污染源。因此,本研究结合实际情况,通过单因素评价法、均值型指数综合评价法以及多元统计分析法对位于贵州省施秉县的白云岩喀斯特遗产地的水质现状进行分析评价,以期为遗产地的环境保护和流域水质的管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

施秉白云岩喀斯特世界自然遗产地位于贵州省东部施秉县,地处中国云贵高原东部边缘向湘西低山丘陵过渡的山原斜坡地带,即中国阶梯地势第二级与第三级的过渡地区。地势北高南低,平均海拔 912 m。喀斯特强烈发育,地形破碎,成为一个河流深切的中亚热带喀斯特峡谷区[23-24]。该区年均温度 16 ℃,年均降水 1 220 mm,具有春暖夏凉、四季如春、降水丰沛的中亚热带山地湿润气候特点[25-26]。黄洲河流域位于施秉喀斯特世界自然遗产地内,由遗产地的东部流向西南汇入杉木河,河流长度 14 km。因其由缓冲区流经核心区,缓冲区白垛乡一带人口密度大,居民的生产生活都在此进行,而核心区旅游人数较多,易使河流健康受到威胁,进而影响到遗产地的生态环境[27],故本文选取黄洲河流域作为遗产地内代表性河流,对其进行水质污染综合分析。

1.2 样品采集与处理

本研究选取黄洲河流域 8 个代表性采样点分别为泉眼(DT)支流汇集处(CGH),水库(SK),大量居民居住处(BD),施秉喀斯特遗产地核心区(DYQ),黄洲河与杉木河交汇处(HZH),杉木河漂流终点(NJY),河流流出缓冲区前(JGY)。采样点之间具有连续性,可反映河流水质在流动过程中的变化情况。采样时间为 2017 年 10 月和 2018 年 4 月,样品采集后装于聚乙烯瓶中带回实验室。根据遗产地以及黄洲河流域的实际情况,共选取了 TP,TN,NH_3-N,COD_{Mn},DO,水温,浊度,粪大肠菌群、叶绿素 a 这几种水质监测指标作为评价因子进行研究分析。具体试验数据详见表 1。

各种水质监测指标均按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》[28]在贵州师范大学山地重点实验室进行,其中 DO、水温采用多参数水质监测仪现场测定:TP 采用碱性过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法;TN 采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法;NH_3-N 采用纳氏分光光度法;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾滴定法;Chl-a 采用乙醇和分光光度法;粪大肠菌群的测定采用多管发酵法。

表 1 黄洲河流域各监测点水质指标平均值和标准差

监测点	TN	NH_3-N	TP	COD_{Mn}	Chl-a	DO	浊度
DT	3.965±0.122	0.017±0.014	0.026±0.015	0.832±0.040	0.194±0.002	6.500±0.500	0.700±0.130
CGH	2.582±0.143	0.045±0.034	0.022±0.011	1.981±0.436	1.206±0.644	9.600±0.300	3.615±0.165
SK	1.095±0.070	0.045±0.014	0.031±0.004	2.855±0.473	3.122±0.144	8.100±0.200	6.360±0.170
BD	0.620±0.273	0.062±0.010	0.033±0.008	2.436±0.495	2.698±0.061	9.200±0.400	5.280±0.540
DYQ	0.365±0.013	0.005±0.003	0.020±0.004	1.600±0.049	0.220±0.030	8.900±0.400	0.225±0.045
HZH	0.685±0.101	0.012±0.001	0.018±0.009	1.307±0.198	0.392±0.143	9.500±0.500	0.535±0.020
NJY	0.734±0.066	0.012±0.007	0.012±0.001	1.168±0.099	0.822±0.573	10.250±0.250	0.325±0.055
JGY	0.662±0.011	0.006±0.004	0.015±0.006	1.109±0.040	0.266±0.086	9.850±0.350	0.470±0.160

1.3　数据分析方法

本文数据采用 Excel 以及 IBM SPSS Statistics 19.0 处理。Excel 代入公式进行水质指标的平均值和标准差计算绘制表格并利用数据绘制春秋平水期水质状况特征图,SPSS 进行水质指标的聚类分析以及主成份分析。本文采用系统聚类,通过组间连接以及平方 Euclidean 距离法生成平水期采样点聚类树状图。并对春秋平水期水质指标进行主成分分析。

1.4　评价标准

根据《中国南方喀斯特第二期申遗文本》及《中国南方喀斯特第二期世界自然遗产提名地保护管理规划文本》中的要求,遗产地核心区地表水环境质量按(GB3838-2002)Ⅰ类标准控制,缓冲区地表水环境质量按(GB3838-2002)Ⅲ类水标准控制,具体限制详见表 2。其中 DYQ,HZH 执行国家地表水Ⅰ类标准,其余采样点执行国家地表水(GB3838-2002)Ⅲ类标准。

表 2　水质监测指标评价标准及标准值

监测指标	评价标准	标准值	
总磷/(mg·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≤0.02	Ⅲ类≤0.2
总氮/(mg·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≤0.2	Ⅲ类≤1.0
氨氮/(mg·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≤0.15	Ⅲ类≤1.0
高锰酸盐指数/(mg·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≤2	Ⅲ类≤6
溶解氧/(mg·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≥7.5	Ⅲ类≥5
水温/℃	GB3838-2002	—	—
粪大肠菌群/(个·L^{-1})	GB3838-2002	Ⅰ类≤200	Ⅲ类≤10000
浊度(NTU)	—	—	—
叶绿素 a/(mg·m^{-3})	—	—	—

2　结果与分析

2.1　黄洲河流域春、秋平水期水质状况特征对比

由图 1—8 可知,研究区不同采样点的水质指标差异明显。个别水质指标 10 月和 4 月折线图变化具有明显相似性,变化规律较为一致,折线呈现逐渐降低趋势。表明秋季平水期和春季平水期水质总氮、高锰酸盐、溶解氧,浊度差异较小且随着河流由上游至下游具有一定的变化规律,由上游至下游水质污染减少,水体具有一定的自净能力。10 月份各采样点均未测出粪大肠菌群,4 月份 BD,JGY 检测出极少量粪大肠菌群。10 月份水质氨氮、高锰酸盐指数、溶解氧含量、叶绿素 a 整体优于 4 月份,4 月份水质总磷含量整体优于 10 月份,其他水质指标差别较小。

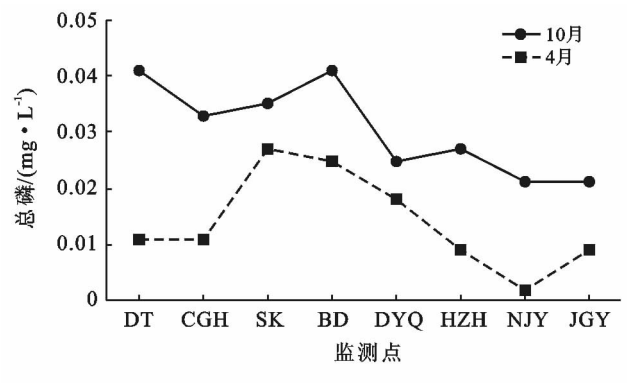


图 1　研究区 4 月和 10 月总磷含量变化

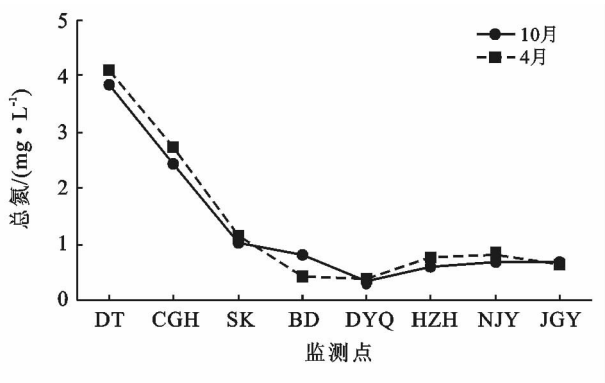


图 2　研究区 4 月和 10 月总氮含量变化

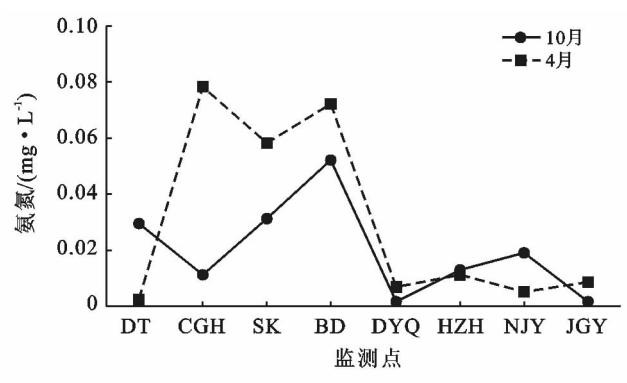


图 3　研究区 4 月和 10 月氨氮含量变化

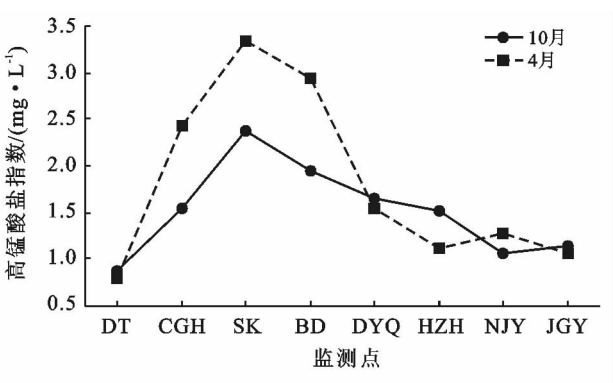


图 4　研究区 4 月和 10 月高锰酸盐含量变化

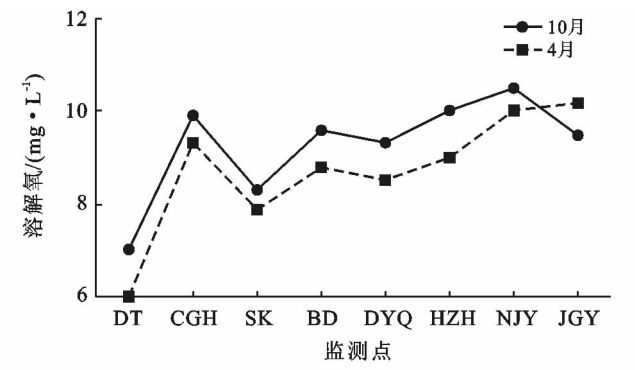


图 5 研究区 4 月和 10 月溶解氧含量变化

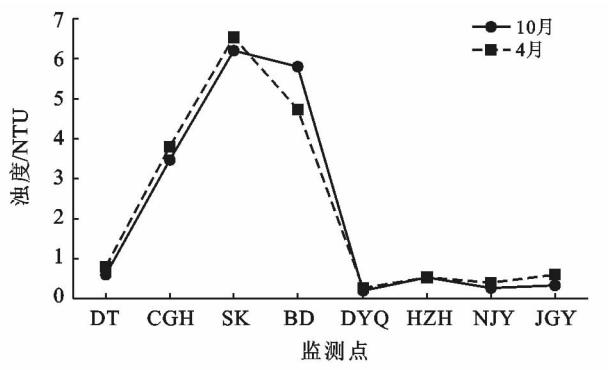


图 6 研究区 4 月和 10 月浊度含量变化

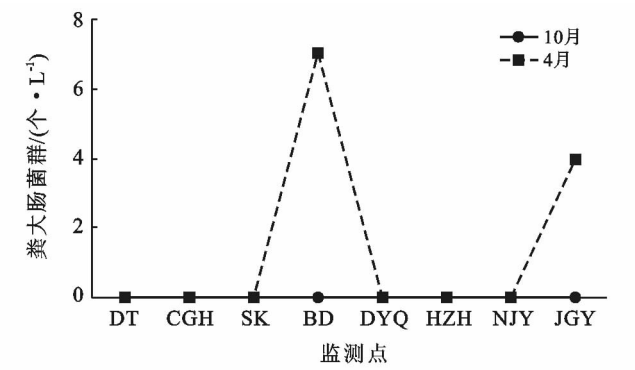


图 7 研究区 4 月和 10 月粪大肠菌群含量

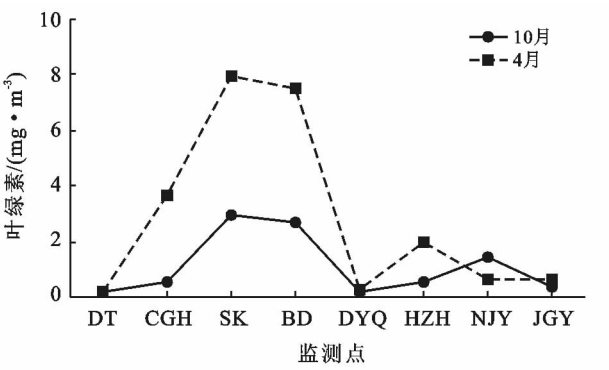


图 8 研究区 4 月和 10 月叶绿素 a 含量

2.2 黄洲河流域水质现状及污染分析

2.2.1 黄洲河流域水质单因素分析[29] 单项污染指数计算方法如下所示:其中 C_i 为指标 i 的实测浓度;S_i 为指标 i 的评价标准值。$P_i>1$ 说明该污染物超标,$P_i\leqslant 1$ 说明该污染物没有超标。

$$P_i=C_i/S_i$$

通过相关文献及实地调查,发现施秉喀斯特世界自然遗产提名地远离城市和工厂,较少受到“三废”的污染。但是缓冲区内有农业生产,化肥和农药的使用对提名地水环境的保护存在威胁且上游缓冲区的河流周边居民随意丢弃的生活垃圾会随着大水流到下游提名地内,造成水面污染[27]。故确定 TP,TN,NH_3-N,COD_{Mn}作为评价指标。表 3 为 2017 年 10 月和 2018 年 4 月水质单因素评价结果。10 月位于遗产地核心区的 DYQ,HZH 总磷含量超Ⅰ类水标准,DYQ 总氮含量超Ⅰ类水标准,HZH 总氮含量超Ⅱ类水标准。位于缓冲区的 DT,CGH,SK 总氮含量超出Ⅲ类水标准。BD,NJY,JGY 所有指标均符合Ⅲ类水标准。4 月位于遗产地核心区的 DYQ,HZH 总氮含量超Ⅰ类水标准,其他指标均符合Ⅰ类水标准。位于缓冲区的 DT,CGH,SK 总氮含量超出Ⅲ类水标准,BD,NJY,JGY 所有指标均符合Ⅲ类水标准。

表 3 10 月和 4 月水质单因素评价结果

监测点	10 月				监测点	4 月			
	总磷	总氮	氨氮	高锰酸盐指数		总磷	总氮	氨氮	高锰酸盐指数
DT	0.205	3.843	0.030	0.145	DT	0.055	4.086	0.003	0.132
CGH	0.165	2.439	0.011	0.258	CGH	0.055	2.724	0.078	0.403
SK	0.700	1.025	0.031	0.397	SK	0.540	1.165	0.058	0.555
BD	0.205	0.792	0.052	0.324	BD	0.125	0.447	0.072	0.489
DYQ	1.250	1.760	0.013	0.832	DYQ	0.900	1.890	0.047	0.768
HZH	1.350	2.920	0.087	0.753	HZH	0.450	3.925	0.073	0.555
NJY	0.105	0.668	0.019	0.178	NJY	0.010	0.799	0.005	0.212
JGY	0.105	0.672	0.002	0.192	JGY	0.045	0.651	0.009	0.178

2.2.2 黄洲河流域水质均值型指数综合评价 水质单因素评价法仅能够清晰的表现出不同月份各采样点的每种水质指标是否超标,为了综合评价各采样点的水质状况,则采用均值型指数评价法进行评价,并

通过表 4 查询[30]各采样点水质污染级别,绘制水质污染状况详见表 5。综合污染指数计算方法为:

$$P=(\sum_{i=1}^{n}P_i)/n$$

式中:P_i——单项污染指数;P——综合污染指数;n——所选取的指标个数。

由于采样点由上至下反映的是河流上游至下游的关系,由表 4 可知,河流的上游到下游水质状况逐渐改善(DYQ,HZH 水质评价标准相对于其他点不同),由重污染转变为重污染轻污染以及尚清洁。且 10 月份和 4 月份水质污染状况保持一致。通过折线图、水质单因素评价以及水质均值型指数评价可知,从黄洲河上游至下游,水质污染状况相对改善,水体有较强的自净能力,但由于核心区和缓冲区执行的地表水环境质量标准不同,上游产生的大量污染虽然随着河流流动得到净化,但仍会对遗产地核心区水质产生较大影响,找出上游的污染源并对其进行控制才是保护遗产地核心区的水环境质量的关键,因此本文将继续对黄洲河流域水质进行多元统计分析。

表 4　地表水质量分级标准

水质指数	污染级别	分级依据
<0.2	清洁	多数项目未检出,个别项目检出也在标准内
0.2~0.4	尚清洁	检出值均在标准内,个别接近标准
0.4~0.7	轻污染	个别项目检出值超过标准
0.7~1.0	中污染	至少有两个项目检出值超过标准
1.0~2.0	重污染	有相当一部分检出值超过标准
>2.0	严重污染	相当一部分检出值超过标准值数倍或几十倍

表 5　研究区 10 月和 4 月水质指标均值型指数

监测点	10 月			监测点	4 月		
	均值型综合污染指数	污染级别	超标污染物		均值型综合污染指数	污染级别	超标污染物
DT	1.056	重污染	总氮	DT	1.069	重污染	总氮
CGH	0.718	中污染	总氮	CGH	0.815	中污染	总氮
SK	0.538	轻污染	总氮	SK	0.580	轻污染	总氮
BD	0.343	尚清洁	无	BD	0.283	尚清洁	无
DYQ	0.964	中污染	总磷、总氮	DYQ	0.901	中污染	总氮
HZH	1.278	重污染	总磷、总氮	HZH	1.251	重污染	总氮
NJY	0.243	尚清洁	无	NJY	0.257	尚清洁	无
JGY	0.243	尚清洁	无	JGY	0.221	尚清洁	无

2.3　黄洲河流域水质多元统计分析

2.3.1　聚类分析　基于黄洲河流域采样点聚类结果如图 9 所示。在空间区域上划分为 A,B 两类 A 又分为A_1 和 A_2 两类。A_1 类水质较好,包括 HZH,JGY,DYQ,NJY,表示遗产地核心区以及核心区下游的水质状况,遗产地提名地远离城市和工厂,较少受到污染,因此水质较好。A_2 类水质中等,主要包括 SK,BD,表示核心区上游的缓冲区内的水质状况,此区域流经小型水库、耕地和乡镇,居民生活污水以及农业面源污染以及上游污染负荷对该区域水质影响较大。B 类水质较差,包括 DT,CGH,表示更为上游的缓冲区内泉眼以及支流交汇处水质状况,此区域流经大面积耕地区以及零散的居民区,主要受到农业面源污染影响。黄洲河流域采样点水质聚类分析结果跟水质均值型指数综合评价结果一致,表现为流域内上游缓冲区污染较严重,水质较差,下游核心区主要为河水流动带来的上游污染,由于水体有一定的自净能力,因此水质较好,且水质由上游至下游逐渐转好。

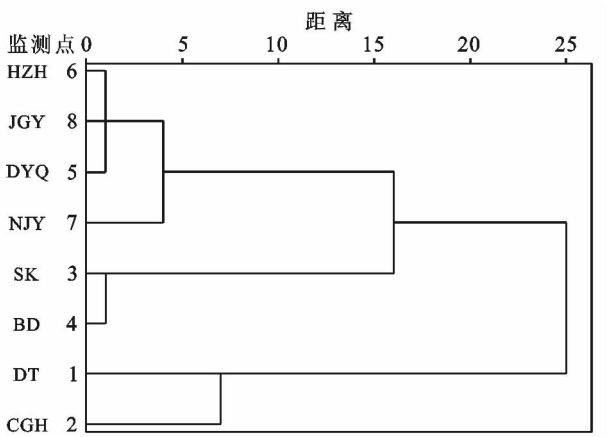


图 9　黄洲河流域采样点空间聚类

2.3.2　主成分分析　在本研究中,KMO 统计量为 0.517,Bartlett 的球形检验值小于 0.001,说明独立变量存在相互关系,符合主成分分析要求。利用特征值大 1.0 的原则筛选提取出前 3 个主成分(表 6),它们解释了原始变量 81.009%的结果,基本反映了原数据所包含的信息。各主成分的特征值、方差贡献率详见表 7。

表 6 黄洲河流域水质监测指标相关性分析

指标	TN	NH_3-N	TP	COD_{Mn}	Chl-a	DO	水温	浊度	粪大肠菌群
TN	1.000	0.161	0.100	−0.243	−0.180	−0.662**	−0.418	0.002	−0.180
NH_3-N		1.000	0.458*	0.422*	0.618*	−0.347	0.147	0.655**	0.315
TP			1.000	0.268	0.112	−0.148	−0.319	0.480	0.366
COD_{Mn}				1.000	0.863	−0.033	0.623**	0.841**	−0.004
Chl-a					1.000	−0.069	0.624**	0.726**	0.000
DO						1.000	0.097	−0.129	0.177
水温							1.000	0.445*	−0.077
浊度								1.000	0.250
粪大肠菌群									1.000

注：* 表示显著相关，* * 表示极显著相关。

表 7 相关矩阵的特征值、方差和累积方差贡献率

主成份	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.622	40.247	40.247
2	2.127	23.636	63.883
3	1.541	17.126	81.009

黄洲河流域平水期水质指标主成分分析结果详见表 8，载荷图如图 10 所示，共提取 3 个主成分。第 1 主成分的方差差贡献率为 40.247%，其中浊度、COD_{Mn}和 Chl-a 所占因子载荷较大，与第 1 主成分的相关系数均超过了 0.900。COD_{Mn}是有机污染的标志，Chl-a 间接反应了水体富营养化水平，而浊度则表示水中悬浮物质造成的浑浊现象，中上游分布大量居民区，生活污水、固体垃圾随雨水流入河流，烤烟等农作物的大量种植，水质主要受到居民生活污水以及农业面源污染的影响。第 1 主成分反映了大量有机污染影响下水体的富营养状态以及浮游植物繁殖而造成的水体浑浊。该区域第 2 主成分的方差贡献率为 23.636%，与第 2 主成分密切相关的因子载荷是 TN 和 DO，TN 第 2 主成分呈正相关，DO 与第 2 主成分成负相关，高浓度的总氮一般反应农业径流引起的地表水中氮物质超标，引起微生物大量繁殖，消耗水中溶解氧。第 3 主成分的方差贡献率为 17.126%，与第 3 主成分密切相关的因子载荷是粪大肠菌群，是人、畜粪便流入水体带来的污染，反映了水体受到生活污染以及家禽养殖的影响。

表 8 黄洲河流域平水期水质指标主成分分析

因 子	主成份		
	PC_1	PC_2	PC_3
总氮	−0.166	0.797	−0.417
氨氮	0.729	0.452	0.087
总磷	0.386	0.567	0.526
高锰酸盐指数	0.913	−0.183	−0.128
叶绿素 a	0.901	−0.157	−0.211
溶解氧	−0.121	−0.712	0.532
水温	0.598	−0.599	−0.321
浊度	0.923	0.145	0.063
粪大肠菌群	0.214	0.145	0.795

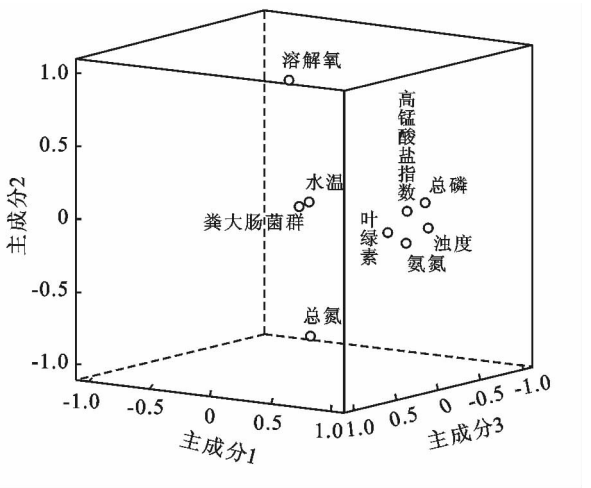


图 10 黄洲河流域平水期水质主成份载荷图

3 结论与讨论

3.1 结 论

(1) 水质指标单因素分析法显示，黄洲河流域春季和秋季平水期缓冲区水质总体符合(GB3838-2002)Ⅲ类水标准，核心区水质部分不满足(GB3838-2002)Ⅰ类水标准，污染物质主要为总氮。

(2) 水质均值型指数综合评价法结果表明，春季平水期和秋季平水期水质污染情况基本相同，总体 10 月优于 4 月。黄洲河上游至下游，水质污染状况相对改善，水体有较强的自净能力，上游产生的大量污染虽然随着河流流动得到净化，但还是会对遗产地核心区水质产生较大影响，找出上游的污染源并对其进行控制才是保护遗产地核心区的水环境质量的关键。

(3) 为了便于流域水质管理，利用聚类分析将采样点的水污染情况在空间上分为三组：核心区上游的缓冲区内的水质状况；更为上游的缓冲区内泉眼以及支流交汇处水质状况；遗产地核心区以及核心区下游的水质状况。相关性分析和主成分分析结果表明：平水期黄洲河流域的污染源主要为生活污水、固体垃圾以及农业面源污染。

3.2 讨 论

由研究可知,施秉白云岩喀斯特黄洲河流域平水期的主要污染因子为总氮,污染源主要是农业面源污染,以及生活污水、固体垃圾的排放。因此对施秉白云岩喀斯特遗产地进行环境保护和流域水质综合管理时应大力推行生态平衡施肥技术和生态防治技术,减少遗产地居民对氮、磷肥料的长期大量施用,防止未被土壤吸收的肥料通过地表径流、农田排水流入周边地表和地下水体从而引发氮、磷等污染物超标,造成水体富营养化和有机污染。同时在农田与水体之间设置植被缓冲带,缓冲农业面源污染物对水体带来的污染;因地制宜选择适应性强的污水处理模式、垃圾处理方式,防止生活污水的随意排放以及生活垃圾进入地下水和河道,造成水体严重污染。

[参 考 文 献]

[1] 彭建,蔡运龙,何钢,等. 喀斯特生态脆弱区猫跳河流域土地利用/覆被变化研究[J]. 山地学报,2007,25(5):566-576.

[2] 宋同清,王克林,曾馥平,等. 西南喀斯特植物与环境[M]. 北京:科学出版社,2014:1-12.

[3] 李阳兵,侯建筠,谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学,2002,22(3):365-370.

[4] 陈品冬,肖时珍,田秋冬. 世界自然遗产地施秉白云岩喀斯特地貌特征及地质意义研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2016,38(2):122-126.

[5] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. World HeritafeWHC-14 · 38. COM · 8 B [EB/OL]http: // whc. unesco. org/archive/2014/whc14-38com-8B-Add-en. pdf, 2014-05-06.

[6] 胡锋,安裕伦,许璟."亚喀斯特"概念与景观特征的初步探讨:以贵州为例[J]. 地理研究,2015,34(8):1569-1580.

[7] 喻理飞. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J]. 应用生态学报,2002,13(5):529-532.

[8] 戴全厚,严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报,2018,32(2):1-10.

[9] 贾亚男,刁承泰,袁道先. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响:以涪陵丛林岩溶槽谷区为例[J]. 自然资源学报,2004,19(4):455-461.

[10] Zemeckis R, Lazauskas S, Gorton M. The Europeanisation of agri-environmental policy: A case study of water quality in the Lithuanian karst zone[J]. Land Use Policy, 2005,22(3):255-264.

[11] 段超宇,张生,孙标,等. 呼伦湖夏季与冬季水质变化研究[J]. 节水灌溉,2014(4):64-69.

[12] 于玲红,王晓云,李卫平,等. 包头市南海湿地水质现状分析与评价[J]. 环境化学,2017,36(2):390-396.

[13] 杨超杰,贺斌,段伟利,等. 太湖典型丘陵水源地水质时空变化及影响因素分析:以平桥河流域为例[J]. 长江流域资源域环境,2017,26(2):273-281.

[14] 刘新,许梦文,赵珍,等. 鄱阳湖蝶形湖泊水体氮磷等的变化及污染初步评价[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(8):1189-1198.

[15] 者萌,张雪琴,孙瑞,等. 西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子[J]. 湖泊科学,2016,28(2):287-294.

[16] 张亚丽,周扬,程真,等. 不同水质评价方法在丹江口流域水质评价中应用比较[J]. 中国环境监测,2015,31(3):58-61.

[17] 刘晓娟,张玉斌,王煜明,等. 甘肃盐池湾国家级自然保护区高寒湿地水环境质量调查与评价[J]. 水土保持通报,2018,38(2):160-165.

[18] 施练东,竺维佳,胡菊香,等. 汤浦水库及入库支流水质时空变化特征与影响因素分析[J]. 水生态学杂志,2013,34(5):9-15.

[19] 杨斌,方怀义,许丽莉,等. 钦州湾水质污染时空变化特征及驱动因素[J]. 海洋环境科学,2017,36(6):877-883.

[20] 刘双爽,陈诗越,姚敏,等. 天津地区团泊洼水库和七里海沼泽水质研究[J]. 湿地科学,2014,12(2):257-262.

[21] 于东升,袁宏林,王倩,等. 太湖西岸水体污染物时空分布及解析[J]. 环境工程,2016,34(9):61-65.

[22] Ogwueleka T C. Use of multivariate statistical techniques for the evaluation of temporal and spatial variations in water quality of the Kaduna River, Nigeria[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015,187(3):137.

[23] 陈品冬,肖时珍,田秋冬. 世界自然遗产地施秉白云岩喀斯特地貌特征及地质意义研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2016,38(2),122-126.

[24] 李高聪,熊康宁,肖时珍. 施秉喀斯特地貌世界遗产价值研究[J]. 热带地理,2013,33(5):562-569.

[25] 顾秉谦,周明忠,肖世珍,等. 贵州施秉世界自然遗产地喀斯特地貌的地质控制研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2016,38(10):132-138.

[26] 李世奇,熊康宁,苏孝良,等. 世界自然遗产提名地施秉喀斯特地貌及其演化[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2012,30(3):12-17.

[27] 贵州师范大学,贵州省地理学会. 中国南方喀斯特(第二期)保护管理规划[M]. 贵州 贵阳:贵州省地理学会,2013.

[28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002:210-284.

[29] 彭文启,张祥伟. 现代水环境质量评价理论和方法[M]. 北京:化学工业出版社,2005:32-39.

[30] 贺克雕. 滇池水质状况综合评价及变化趋势分析[J]. 人民长江,2012,43(12):37-41.