

喀斯特流域总磷总氮特征及负荷分析

——以贵州省普定县后寨河流域为例

金晓俊 陈波* 赵美刚

普定县岩溶研究办公室 贵州普定 502100

摘要：后寨河流域是贵州省典型的封闭岩溶小流域，其岩溶水总磷（TP）、总氮（TN）含量对流域生态系统稳定及水资源可持续利用具有重要意义。本研究依托该流域40年连续监测资料，选取81平方公里流域内的20个监测点，于2024-2025年4月开展每月水质检测，采用分光光度法等仪器分析手段测定TP、TN含量，并结合历史流量数据计算总负荷量，旨在揭示该流域TP、TN的时空分布特征及变化规律，为普定喀斯特地区水资源保护与管理提供科学依据。

关键词：普定县；喀斯特地貌；总磷；总氮；负荷量

一、引言

（一）研究背景

喀斯特地区具有独特的水文地质条件，其水文的研究在全球生态与水资源格局中占据特殊地位。普定县后寨河流域地处长江水系乌江流域三岔河支流，是典型的喀斯特地貌区域。该区域岩溶作用强烈，地表水与地下水相互转化频繁，其水质特性受环境影响较大。近年来，随着区域内城市化进程推进，外来人口增多，农业活动也随之增加，工业化、产业化越发明显，后寨河流域面临着水质恶化的潜在风险，重金属含量随发展累计，氮磷含量变化大，甚至存在水质富营养化的问题。

（二）研究目的与意义

喀斯特地貌区水资源脆弱性特征（如岩溶发育导致的水文过程复杂、污染物迁移特殊性）；

-总磷、总氮作为水体富营养化关键指标，对岩溶水生态功能及饮用安全的影响；

-后寨河流域作为喀斯特小流域典型代表，其氮磷循环研究对区域水资源管理的示范价值。

（三）国内外研究现状

国外学者对喀斯特地区水质研究起步较早，在岩溶水质演变机制等方面取得一定成果。如《Assessing Climate Change Impacts on Future Reliability of Water Supply Systems Served by Karst Aquifers》^[1]，通过评估气候变化对岩溶含水层供水系统未来可靠性影响的模型链，为规划能够减少气候变化影响的适应措施提供了支持。国内针对西南喀斯特地区的研究也逐步增多，在贵州其他喀斯特流域，有研究关注了浅层地下水化学特征，如《贵州典型高原喀斯特山区浅层地下水质量的影响与评价》^[2]（对贵州某喀斯特流域浅层地下水多指标的季节性研究），但针对普定后寨河流域在总磷、总氮等关键水质指标的长期、系统性研究仍显不足。现有研究多集中在特定时段或部分区域，难以全面反映该流域复杂的岩溶水质全貌，本研究将弥补这一空缺。

二、研究区域与方法

（一）研究区域概况

普定县地处黔中高原西部的长江水系乌江上游三岔河支流与珠江水系北盘江支流白水河之间的分水岭地区，区内地面河均流入三岔河。由于岩溶发育，石灰岩地区河水渗漏严重，形成23条地下河。本研究区域即普定后寨河于贵州省普定县，地理坐标105° 40' — 105° 49' E, 26° 12' ' — 26° 18' N，面积81km²。流域位于普定复式向斜南西扬起端转折部位，横穿向斜，沿北东及北西两组区域构造裂隙追踪发育。地下河主要发育在关岭组第二段灰岩中，明流段为关岭组第三段一、

基金项目：安市科社（2022）05号；黔科合支撑（2023）一般190；

作者简介：金晓俊（1999.08-），女，布依族，本科，助理工程师，从事水质化验工作；

***通讯作者：**陈波，本科，高级工程师，长期从事水文地质及工程地质、岩溶环境等工作。

二亚段白云岩；地下河系上游处于峰林洼地地貌。在分水岭地带，地下水埋藏较大，达10m以上，中下游处于喀斯特缓流及峰林孤丘谷地，地下水埋藏逐渐变浅。

其源头分三支：陈旗堡支流、长冲支流及母猪洞支流。且两支发源于后山、赵家田及新寨一带，均沿北东向裂隙发育，向南西伏流1km多，分别于陈旗堡和长冲两处排出地表，转为明流，注入灯盏河。

母猪洞支流，是本地下河主要发源地。发源于打油寨、团山一带。源头由三短支流组成，汇入团山，沿北东向裂隙发育，向南西伏流，在母猪洞排出地表，流一段后又消失于地下，在马官北东700m处天窗出现，并与羊皮寨短支流相汇合，汇合于号云河，后与另外两支交汇于平山注入青山水库，最后汇入三岔河流入乌江。

(二) 数据采集

1. 监测点设置

研究团队对普定县81平方公里封闭岩溶小流域开展了全面的野外调查，通过实地踏勘、地质测绘和水文调查等方法，详细记录了地层岩性、径流类型、地质特性

(如溶洞、落水洞、天窗等)的分布相关情况，最终在后寨河流域内共设置20个监测点(见表1 监测点位置坐标统计)，其中团山泉点、冯家泉点两个监测点，因未受人为因素干扰，其水质数据具有较高的参考价值，作为对照分析点进行检测。这些监测点均匀分布于流域的补给区、径流区、排泄区域，以确保能够全面代表流域内的水质状况(见图1后寨河流域核心区点位图)。

2. 采样频率与时间

自2024年初至2025年初，对20个监测点进行每月一次的水样采集工作。该时间段，涵盖丰水期、枯水期等不同水期水质变化，可获取完整的水文年数据；另一方面，能与历史监测数据相衔接，便于进行长期趋势分析。采样时间固定在每月月初至中旬，以减少因采样时间差异带来的误差。采样严格遵循相关采样规范，使用洁净的采样瓶，在水体表层以下0.5米处采集水样，每个监测点采集水样量不少于500ml，并立即做好标签记录，包括采样点编号、采样时间、水当天水样温度、PH值等信息。

表1 监测点位置坐标统计

序号	支流	径流类型	地质特性	监测点名称	坐标	海拔高度(米)
1	后寨河	补给区	地下河出口	打油	105° 80'0", 26° 24'8"	1350
2			地下河出口	母猪洞	105° 77'9", 26° 23'0"	1338
3			地下河出口	羊皮寨	105° 77'3", 26° 21'4"	1360
4			地下河出口	长冲	105° 77'1", 26° 24'7"	1278
5			泉	团山	105° 78'7", 26° 24'3"	1385
6			天窗	畜牧场	105° 78'2", 26° 23'3"	1350
7		径流区	地下河出口	老黑潭	105° 74'2", 26° 21'7"	1259
8			天窗	山脚	105° 76'4", 26° 22'0"	1301
9			地下河出口	号云河	105° 75'1", 26° 23'2"	1268
10			天窗(地下水位)	羊角冲	105° 74'7", 26° 24'1"	1259
11			天窗	冯家天窗	105° 71'5", 26° 23'6"	1236
12			泉点	冯家泉	105° 71'1", 26° 24'2"	1305
13			地下河出口	陈旗	105° 77'1", 26° 26'0"	1280
14			天窗	下坝	105° 76'0", 26° 24'8"	1294
15			地下河出口	六谷	105° 71'5", 26° 26'6"	1242
16			水库	青山水库	105° 72'7", 26° 26'7"	1244
17		排泄区	天窗	洞口	105° 69'6", 26° 26'08"	1202
18			地下河出口	后寨	105° 69'0", 26° 26'7"	1192
19			地下河出口	陈家庄	105° 70'3", 26° 22'2"	1257
20			地下河出口	类子龙潭	105° 71'2", 26° 21'4"	1263

(三) 分析方法与仪器

采用国家标准分析方法进行样品采集与分析, 配备先进的水质监测仪器Skalar连续流动分析仪(见表2)

表2

指标类型	检测方法	仪器设备
总磷	钼酸铵分光光度法	Skalar连续流动分析仪
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	Skalar连续流动分析仪

(四) 负荷量计算方法

根据历史监测得到的后寨河流域平均流量、平均产流数据, 结合2024-2025年监测得到的总磷、总氮浓度数据, 计算该区域的总磷总氮负荷量。

负荷量计算公式为: 污染物负荷量(kg) = 污染物浓度(mg/L) × 月径流量(m³) × 10⁻³, 月径流量 = 平均流量(m³/s) × 86400秒 × 每月天数。

其中, 平均流量和数据来源于流域内长期水文监测站的监测记录, 通过对多年数据的统计分析得到; 污染物平均浓度则是根据20个监测点在2024-2025年期间每月检测的总磷、总氮浓度数据, 通过算术平均计算得出。

通过该方法, 能够评估流域内总磷、总氮污染物的输出状况, 更加直观的展示该区域总磷、总氮污染物的季节变化, 为分析水质特性变化来源提供依据。

三、结果与分析

(一) 普定喀斯特后寨河流域总磷特征分析

分析2024年后寨河流域数据, 总磷平均值为0.0470mg/L, 其中最大值为0.1734mg/L, 未超过地表水Ⅲ类标准(≤0.2mg/L)。

(二) 普定喀斯特后寨河流域总氮特征分析

根据2024年后寨河流域的水质监测数据显示, 后寨河流域总氮月均浓度达8.1226mg/L, 显著超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类水体标准限值(≤1.0mg/L), 并高达8倍以上。同时, 总氮含量随季节变化明显, 从2024年4月开始月均含量呈不断上升趋势。

分析团山泉和冯家泉点两个采样点的位置, 团山泉发育于岩溶地区山麓部位, 处于可溶岩(如灰岩、白云岩)与非可溶岩接触带或岩溶洼地边缘。受岩溶地下水

径流系统控制, 其出露位置往往与区域性岩溶水动力分带中的垂直渗流带向水平径流带过渡区域吻合, 泉水径流路径可能通过溶蚀裂隙、管道系统接受上游补给, 其水质对岩溶含水层渗透性具有较强响应性。

冯家泉点定位于山坡坡体结构面, 具体表现为沿岩溶构造裂隙带或层面裂隙发育的上升泉或下降泉, 其水质对岩溶含水层渗透性响应较弱。

这是由于特殊的喀斯特岩溶地貌导致地表水体快速下渗, 地面与其他地区的污染物跟随地表水下渗到其他水体中。在这种地质背景下, 农业生产活动产生的化肥流失、畜禽养, 殖废水等面源污染物极易通过岩溶裂隙、落水洞等通道直接渗入地下, 进而造成水体氮素持续累积, 导致总氮浓度长期处于高位状态, 并不断上升。因此, 团山泉点周围虽然无人活动、农耕施肥影响, 总氮含量依旧随时间呈上升趋势。

四、结论总结

通过对普定后寨河流域水体样品的监测分析得出, 该流域水体总氮浓度远超标准《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类水体标准限值(≤1.0mg/L), 说明氮类污染物对水质影响较大, 同时经过长时间的检测发现, 该地区对氮类污染物分解处理能力较差, 污染物会随着时间积累, 其含量逐渐增加。

普定县受喀斯特地区地貌因素影响, 以后寨河流域监测数据可以看出, 即使无人因素影响, 水体中也会因降雨、水资源流动而累积大量污染物, 对人类生活、环境造成了严重的影响, 因此加大对水资源的监测力度, 对氮类污染物的排放严加监管, 避免对水资源造成不可逆破坏, 水资源管理与整治刻不容缓。

参考文献

[1]Palazzolo N ,Peres J D ,Mineo C , et al.Assessing Climate Change Impacts on Future Reliability of Water Supply Systems Served by Karst Aquifers[J].Water Resources Management,2025,(prepublish):1-14.

[2]郭琴.贵州典型高原喀斯特山区浅层地下水质量的影响与评价[D].贵州师范大学, 2017.