

前言

PREFACE

河流水环境和水生态质量对涵养水源、净化水质、保护生物多样性、建设生态廊道等方面具有重要影响。近年来，我国对水污染的防治已经取得了显著效果，但很多流域的水生态质量状况却不容乐观，出现了不同程度的生物多样性减少、河湖生态功能退化、富营养化等生态环境问题。要长期解决流域水生态环境问题，就要建立稳定、健全的水生态环境管理体系。

在流域水环境监测评价体系中，除水质标准外，还需要综合考虑流域水生生物、生态功能、自然地理特征、社会经济特征等因素，以便更全面地了解流域水环境状况，建立更加完善的流域水环境监测评价体系，提升水生态环境精细化管理能力。目前关于河流水环境监测系统已经拥有较为成熟的监测布点方式和完善的指标体系，但对河流水生态监测点位布设及其优化尚处于起步阶段，没有明确的参考指标体系和研究方法。同时，不同类型的水生态功能区划应以“分级、分区、分类、分期”的形式进行管理，发挥流域水生态功能区划作用，充分保护流域生态健康。因此，对河流现有水生态监测点位进行优化和补充并进行分区管理，具有重要的科学价值与现实意义。

宁夏地处黄河上游区域，水资源短缺，生态环境敏感复杂。境内水系主要有黄河干流、支流、沿黄湖泊以及主要排水沟系，共布设有水环境监测断面 116 个，而水生态监测断面仅有 2 个，且为黄河（宁夏段）干流国控断面。《宁夏水生态环境保护“十四五”规划（征求意见稿）》要求“十四五”规划期间在宁夏境内持续改善水环境质量，初步恢复水生态系统功能，建立完善的水生态保护治理体系。因此，为确保整个流域的生态健康及水生态功能的正常发挥，从而实现流域水质安全及水生态完整性的管理目标，建立优化水生态监测断面并实行水生态分区管理是宁夏建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区亟待完成的任务。

本书以黄河流域宁夏段为研究区域，在现有水环境监测点位的基础上，以采集和监测到的区域水生生物指标、区域环境因子、水生生物栖息地信息为依据，从水环境理化参数、水生生物群落结构、水生生物多样性等多个方面，分析研究黄河流域宁夏段水生

态环境现状,明确该区域主要环境因子空间异质性及水生生物群落的时空变化。并以此为基础,构建了水生态监测指标体系,建立优化了符合区域实际情况的水生态监测点位。结合地形地貌、气候水文、土地利用、人类活动、社会经济等要素,对研究区进行区域划分,建立适合本流域的水生态功能分区指标体系和方法,完成了水生态功能一、二、三级分区。

本书得到了宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03)与宁夏自然科学基金重点项目(2023AAC02026)资助。本书的审图人员为宁夏自然资源成果质量检验中心张淑霞工程师。本书第4、第7章由邱小琮主笔;第2、第3、第8章由赵睿智主笔;第5、第6章由赵增锋主笔;第1、第9章由尹娟主笔。李霖、胡凯、刘双羽、万永鹏、蒙俊杰等参与了本书的部分研究与撰写工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,望专家和同仁不吝指正。

著 者

2025年5月

前言

第 1 章 概述	1
1.1 区域概况	1
1.1.1 地理位置及地形地貌	1
1.1.2 流域水系特征	1
1.1.3 流域气象、水文要素	2
1.1.4 土壤特征	2
1.1.5 土地利用类型	3
1.1.6 人口及社会经济概况	3
1.2 研究背景与意义	3
1.3 主要内容	5
1.4 黄河流域（宁夏段）水生态环境数据采集与分析	7
1.4.1 样点布设与采样时间	7
1.4.2 样品采集方法	9
1.4.3 样品处理与分析	11
第 2 章 水环境参数时空分布特征及空间异质性	14
2.1 材料与方法	14
2.1.1 采样点设置及样品采集	14
2.1.2 样品处理与分析	14
2.1.3 统计分析方法	14
2.2 水体水环境参数的时空分布及空间差异	16
2.2.1 水体主要理化参数的时空分布	16
2.2.2 水体理化参数的空间差异	18
2.3 表层沉积物理化参数时空分布及空间差异	20

2.3.1	表层沉积物理化参数的时空分布	20
2.3.2	表层沉积物理化参数的空间差异	22
2.4	小结	24
第3章	水生生物群落结构及多样性	26
3.1	材料与方法	26
3.1.1	采样点设置及样品采集	26
3.1.2	样品处理方法	26
3.1.3	多样性指标计算方法	26
3.1.4	统计分析方法	28
3.2	水生生物群落结构及多样性	28
3.2.1	浮游植物群落结构及多样性	28
3.2.2	浮游动物群落结构及多样性	32
3.2.3	大型底栖动物群落结构及多样性	35
3.2.4	浮游细菌群落结构及多样性	38
3.2.5	沉积物细菌群落结构及多样性	40
3.3	水生生物空间异质性分析	41
3.4	小结	44
第4章	栖息地综合指数与生物完整性指数	46
4.1	材料与方法	47
4.1.1	采样点设置及样品采集	47
4.1.2	样品处理与分析	47
4.1.3	水生生物完整性指数指标筛选方法	47
4.2	栖息地综合指数与水质评分	48
4.2.1	栖息地评价指标及其标准	48
4.2.2	栖息地综合指数	50
4.2.3	水质评分	54
4.3	水生生物完整性指数构建	57
4.3.1	生物完整性指数参照点确定	57
4.3.2	浮游植物生物完整性指数(P-IBI)构建	59
4.3.3	浮游动物生物完整性指数(Z-IBI)构建	63
4.3.4	底栖动物生物完整性指数(B-IBI)构建	67
4.3.5	浮游细菌生物完整性指数(M-IBI)构建	73
4.3.6	生物多样性指数(IBM)计算结果	77
4.4	小结	81

第 5 章 沉积物细菌群落特征及其驱动因子研究	82
5.1 材料与方法	83
5.1.1 样点布设与样品采集测定	83
5.1.2 数据处理与分析	83
5.2 沉积物细菌群落多样性	84
5.3 沉积物细菌群落结构特征	86
5.3.1 门水平下沉积物细菌群落结构特征	86
5.3.2 属水平下沉积物细菌群落结构特征	87
5.3.3 沉积物细菌群落结构特征比较	88
5.4 沉积物细菌群落共现网络	90
5.4.1 不同月份沉积物细菌群落共现网络	91
5.4.2 不同区域沉积物细菌群落共现网络	92
5.5 黄河流域宁夏段沉积物细菌群落结构时空分异特征	93
5.6 沉积物细菌群落多样性指数与环境因子的关系	96
5.7 沉积物细菌群落结构与环境因子的关系	98
5.7.1 沉积物优势菌门与环境因子的关系	98
5.7.2 沉积物优势菌属与环境因子的关系	98
5.8 沉积物细菌共现网络拓扑特征与环境因子的关系	99
5.9 沉积物细菌群落结构的驱动因子	100
5.10 小结	101
第 6 章 沉积物重金属分布特征及风险评价	105
6.1 材料与方法	106
6.1.1 采样点布设与采样时间	106
6.1.2 样品测定	106
6.2 黄河流域宁夏段沉积物重金属含量特征	106
6.2.1 黄河流域宁夏段 4 月份沉积物重金属含量特征	106
6.2.2 黄河流域宁夏段 7 月份沉积物重金属含量特征	107
6.2.3 黄河流域宁夏段 10 月份沉积物重金属含量特征	108
6.2.4 黄河流域宁夏段沉积物与其他水域沉积物重金属含量比较	109
6.3 黄河流域宁夏段沉积物重金属的时空分布特征	109
6.3.1 沉积物 Pb 的时空分布特征	109
6.3.2 沉积物 Hg 的时空分布特征	110
6.3.3 沉积物 As 的时空分布特征	110
6.3.4 沉积物 Cr 的时空分布特征	111
6.3.5 沉积物 Cd 的时空分布特征	112

6.4	黄河流域宁夏段 4 月份沉积物重金属多元统计分析	113
6.4.1	相关分析	113
6.4.2	主成分分析	114
6.4.3	系统聚类分析	115
6.5	黄河流域宁夏段 7 月份沉积物重金属多元统计分析	115
6.5.1	相关分析	115
6.5.2	主成分分析	116
6.5.3	系统聚类分析	117
6.6	黄河流域宁夏段 10 月份沉积物重金属多元统计分析	118
6.6.1	相关分析	118
6.6.2	主成分分析	119
6.6.3	系统聚类分析	120
6.7	黄河流域宁夏段沉积物重金属生态风险评价	120
6.7.1	污染负荷指数法	121
6.7.2	地累积指数法	122
6.7.3	潜在生态风险指数	123
6.7.4	沉积物重金属质量基准系数法	128
6.8	小结	128
第 7 章 水生态监测指标体系构建与点位优化		131
7.1	水生态数据采集与分析	131
7.2	水生态监测指标体系构建	132
7.2.1	水生态监测指标筛选的原则与方法	132
7.2.2	水质指标筛选	133
7.2.3	黄河流域（宁夏段）水生态监测指标体系	137
7.3	黄河流域（宁夏段）水生态监测断面筛选优化	138
7.3.1	点位优化方法	138
7.3.2	系统聚类结果	140
7.3.3	物元分析结果	142
7.3.4	水生态监测断面优化结果分析与比较	144
7.3.5	黄河流域（宁夏段）水生态监测断面优化结果	146
7.4	黄河流域（宁夏段）水生态现状评价	150
7.4.1	利用生物多样性指数评价	150
7.4.2	水生态健康现状综合评价	154
7.5	小结	159

第 8 章 黄河流域宁夏段水生态功能分区研究	161
8.1 黄河流域宁夏段水生态功能一、二级分区研究	162
8.1.1 黄河流域宁夏段水生态功能一、二级分区目标与原则	162
8.1.2 分区方法	163
8.1.3 黄河流域宁夏段水生态功能一、二级分区指标体系构建	165
8.1.4 黄河流域宁夏段水生态功能一、二级分区方案	172
8.2 黄河流域宁夏段水生态功能三级分区研究	178
8.2.1 黄河流域宁夏段水生态功能三级分区目标与原则	178
8.2.2 分区方法及过程	179
8.2.3 黄河流域宁夏段水生态功能三级分区指标体系构建	181
8.2.4 黄河流域宁夏段水生态功能三级分区方案	185
8.3 小结	191
第 9 章 结论与展望	193
9.1 结论	193
9.2 展望	195
参考文献	197

1.1 区域概况

宁夏地处西北内陆、黄河上中游地区，位于黄土高原、蒙古高原和青藏高原交会地带，属干旱半干旱地带，具有山地、黄土丘陵、灌溉平原、沙漠（地）等多种地貌类型，是我国生态安全战略格局“两屏三带一区多点”中“黄土高原—川滇生态屏障”“北方防沙带”和“其他点块状分布重点生态区域”的重要组成部分，也是我国西部重要的生态屏障，在祖国生态安全战略格局中具有特殊地位，生态区位十分重要，保障着黄河上中游及华北、西北地区的生态安全。黄河自西向东穿越了宁夏北部地区，其流域覆盖了宁夏大多数地区，对宁夏生态环境和社会经济发展起着重要的支撑作用^[1]。选择该流域开展水生态环境及功能分区研究具有较强的代表性和现实意义。

1.1.1 地理位置及地形地貌

黄河从中卫市南长滩入境宁夏，流经卫宁灌区到青铜峡水库，出库入青铜峡灌区至石嘴山麻黄沟出境，区内全长 397km，约占黄河总长的 7%^[2]。黄河流域宁夏段位于北纬 35°14′~39°23′，东经 104°17′~107°39′之间，流域面积为 51800km²，覆盖了银川市、中卫市、石嘴山市和吴忠市全境及固原市原州区。该流域地处中国地质地貌东西部的分界，即贺兰山—六盘山—龙门山—哀牢山近南北一线的北段，为国内地势的东部第一阶梯向西第二阶梯的转折过渡带。流域毗邻腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙漠，南面与黄土高原相连。流域内地势南高北低，地形南北狭长，南部以流水侵蚀的黄土地貌为主，中北部以干旱剥蚀、风蚀地貌为主，自南而北有六盘山地、黄土丘陵、中部山地丘陵盆地、灵盐台地、宁夏平原、贺兰山地等地貌类型。南部黄土丘陵地区一般海拔 2000m 左右，中部台地与山间平原为 1300~1500m，北部平原 1100~1200m，西部高差较大，东部起伏较缓。

1.1.2 流域水系特征

研究区域内流域面积 50km² 及以上河流共 171 条，累计长度 5936km，其中季节性河流 91 条，非季节性河流 80 条。各级支流中流域面积大于 10000km² 以上者仅 1 条，

10000km²以下、1000km²以上的有12条。

清水河是宁夏境内最大的一级支流，河长320km，流域面积14481km²，河道坡降1.49‰，支流8条，流经固原市原州区、西吉县、同心县、海原县和中宁县，最后于泉眼山汇入黄河^[3]。红柳沟河长107km，流域面积1064km²，河道坡降4.16‰，流经同心、中宁两县，于中宁县鸣沙镇汇入黄河^[4]。苦水河是另外一条入黄支流，在宁夏境内河长233km，流域面积4942km²，河道坡降1.6‰，流经同心县、灵武市，于灵武市新华桥汇入黄河。黄河右岸诸沟主要有高崖沟及都思兔河，共计集水面积9532km²。黄河左岸诸沟包括卫宁北山南麓与贺兰山东麓各沟，主要有贺兰山东麓的花石沟、苏峪口沟、大水沟、汝箕沟、大武口沟、红果子沟等，共计集水面积5177km²。

黄河入宁后，水面开阔，水流舒畅，加之平原地区土层深厚、坡降相宜，十分有利于引水灌溉，因而造就了宁夏平原沟渠纵横的农业灌排体系^[5]。宁夏境内有卫宁灌区、青铜峡灌区、固海扬黄灌区、红寺堡扬黄灌区、盐环定扬黄灌区、陶乐扬黄灌区，有西干渠、唐徕渠、汉延渠、惠农渠、秦渠、汉渠、东干渠、跃进渠、七星区等大小引水渠道15条，总长1540km。灌区内排水沟共有131条，总长1874km，集水面积4106km²。

1.1.3 流域气象、水文要素

研究区深处黄土高原、蒙古高原和青藏高原交会的内陆中纬度地带，属于典型的大陆性气候，具有干旱少雨、风大沙多、日照充足、蒸发强烈，冬寒长、春暖快、夏热短、秋凉早，气温年、日差较大，无霜期多变，干旱、冰雹、沙尘、霜冻等灾害性天气发生较为频繁等特点。全年平均气温5~9℃，年温差较大，最高气温一般为32~36℃，最低温度为-7~-10℃，气温的变化随海拔呈现北高南低的特征，年相对湿度为52.21%。引黄灌区无霜期为123~236天，干旱山区无霜期为152~226天。

连续多年的《宁夏水资源公报》显示，宁夏地表水资源总量为7.461亿~11.925亿m³，折合多年平均径流深14.4~23.1mm，地表径流时空分布不均匀，年际及年内变化较大，水资源开发利用难度较高。此外，由于集中性的降水、植被稀疏以及土壤长期干燥，水土流失较为严重。黄河宁夏段干流含沙量3.8kg/m³，年输沙量1.05亿t，清水河、苦水河和红柳沟年平均含沙量6.75kg/m³、0.772kg/m³、28.9kg/m³，年输沙量93万t、10万t、65万t。近十年来研究区年平均降水量为166.874亿m³，折合降水深322mm，降雨量由南向北递减趋势明显，固原市原州区降雨量在450mm以上，而引黄灌区内却不足200mm。近5年平均蒸发量为961mm，研究区蒸发量呈现南部低—中部高一引黄灌区低—北部高的特征。

1.1.4 土壤特征

宁夏自然条件复杂，人类活动地域差异明显，形成了多种多样的土壤类型，根据全国1:100万土壤数据库，宁夏土壤共划分为10个土纲，22个土类，43个亚类，66个土属。依照土壤的地理分布特点、主导土壤类型的自然特点以及主导土壤类型的分布面

积和比例,可将宁夏土壤划分为5个地域区,分别为黄河平原灌淤土盐渍土淡灰钙土区、贺兰山灰褐土粗骨土区、宁中丘陵灰钙风沙土区、宁南黄土丘陵黑垆土黄绵土区及六盘山灰褐土区。

除六盘山灰褐土区外,研究区域基本覆盖了其他4个土壤地域区。流域内的土壤类型主要包括黄绵土、灰钙土、风沙土、灰褐土、灌淤土、新积土、黑垆土、粗骨土等。

1.1.5 土地利用类型

土地利用类型区分土地利用空间地域组成单元的过程,这种空间地域单元是土地利用的地域组合单位,表现人类对土地利用、改造的方式和成果,反映土地的利用形式和用途。研究区内共有8种土地利用类型,分别为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、建筑用地和裸地。草地是黄河流域宁夏段内最主要的土地利用类型,占流域面积的42.67%,其次为耕地,占流域面积的39.47%,主要分布于黄河两岸及清水河两岸。裸地及建筑用地分别占流域面积的9.49%和5.39%,灌木地、水体、草地和湿地占用面积逐渐减小,分别为1.11%、1.08%、0.62%和0.17%。

1.1.6 人口及社会经济概况

根据第七次人口普查及宁夏2022年统计年鉴数据,2020年11月宁夏总人口达720.27万人。截至2022年末,人口总数达到728万人,城镇化率达到66.04%,地区生产总值5069.57亿元,第一产业生产总值407.48亿元,第二产业生产总值2449.10亿元,第三产业生产总值2212.99亿元,人均生产总值为69781元。城镇居民可支配收入达3.83万元,农村居民人均可支配收入达1.53万元。

1.2 研究背景与意义

随着全球人口不断增长和社会经济的迅猛发展,人类对水资源的需求不断上升。与此同时,持续激烈的人类活动对水生态系统造成了严重破坏,过度开发利用等行为造成湖泊、河流和地下水等水资源逐渐枯竭,同时也造成了严重污染,导致水生态系统的失衡与崩溃。水生态环境的崩溃给社会经济的发展带来严重影响,威胁人们的健康与生活。近20年来,全球各流域水生态系统的生物多样性都处于快速减少之中,其恶化程度甚至比土地生态系统要快^[6]。调查表明,我国很多水域存在生态系统功能显著退化的现象,因此,保护水生态系统健康和安全至关重要^[7]。要长期解决流域水生态环境问题,就要建立稳定、健全的水生态环境管理体系^[8-10]。由于不同水生态系统存在不同的生态环境问题,就必须针对不同的水生态系统问题,提出不同的对策和解决方案。

我国大小河川总长共计42余万公里,湖泊面积为7.56km²,占国土总面积的0.8%,水资源总量为28000亿m³,但人均水资源拥有量不足2300m³,仅为世界人均拥有量的四分之一,属于缺水国家。我国自然环境格局的不同导致水资源分布不均,南多北少、

东多西少是我国水资源分布的基本特征。自 20 世纪 80 年代以来,随着全国经济的迅猛发展,城市化进程加快,城市人口随之迅速增加,我国水污染现象越来越严重,不仅降低了水体的使用功能,也进一步加剧了水资源短缺的矛盾,水污染成为制约我国经济社会发展的主要问题之一。

随着我国经济的发展和重视程度的加强,我国在水环境监测方面的法律法规越来越完善、监测技术也越来越高。目前,全国已经形成了国家、省、市、县 4 级的监测网络,全国国控地表水水质监测断面已于 2019 年增至 2767 个,其中考核断面为 1940 个,有关各类规范、标准多达 600 余份,检测设备种类、数量繁多。据 2019 年《中国生态环境状况公报》报道,全国 I~III 类优良水质占 74.9%,比 2018 年上升 3.9 个百分点,劣 V 类占 3.4%,比 2018 年下降 3.3 个百分点,主要污染物为总磷、化学需氧量 Cr 和化学需氧量 Mn。根据《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》,我国地表水环境监测体系仍以重金属和综合性指标为主要控制内容。在该标准框架下,水生生物与有机污染物的监测尚未形成系统性要求,有待进一步完善。

2007 年,水生态监测已经被我国相关部门提上了议程,往后的几年里,国内多个水生态环境监测部门和院所开展了水生态监测的研究工作,逐步明确了水生态监测的内涵和意义。水生态监测是一项为了解、分析、评价水生态而进行的监测工作,它主要涵盖了水质监测和水生生物监测两个方面,通过对水环境因子、水生生物等指标的检测和数据收集,进行分析研究,以了解水生态环境的现状和变化,是水生态保护与修复工作的重要基础,也是保护和优化水资源的保证,对生态文明建设和深层次水资源管理具有十分重要的意义^[1]。党的十八大以来,党中央、国务院高度重视生态环境监测工作,将生态环境监测纳入生态文明改革大局统筹推进,取得了前所未有的显著成效,在《生态环境监测网络建设方案》《关于深化环境监测改革提高环境监测数据质量的意见》等文件的推动下全国水生态监测的建设如火如荼进行了起来。2017 年,根据《国家生态环境监测方案》要求,松花江流域共 64 个监测断面(点位)率先开展了以地表水生物监测及例行理化指标相结合的水生态监测工作。2019 年,长江及其重要支流也开始了水生态监测工作。2020 年,黄河流域源头区、中游及下游各选择了 1~2 个典型水体开展地表水生物试点监测。2021 年,《国家生态环境监测方案》在以往水生态状况调查监测的基础上,对监测指标、频次和点位进行了优化,设置了 695 个监测点位,占全国国控水质监测断面的 25%,其中黄河流域共设置 123 个点位。由此可见,水生态监测工作的比重正在逐步提升,这也说明水生态监测终将会成为我国建设生态文明进程中常态化、广泛性的一项工作。

宁夏回族自治区地处黄河上游,国土面积 6.64 万 km²,全境海拔 1000m 以上,属典型的大陆性半湿润半干旱气候,降水少且分布不均,气候干旱,蒸发强烈,经济社会发展对域内和过境河湖资源高度依赖,加之干旱多风、植被稀少、水蚀风蚀活跃等因素,导致水环境容量较小,水生态系统稳定性差,大气、水、土壤的自然净化能力低,部分地区几乎没有可供利用的水体污染负载能力,水环境污染问题较为严重。据《宁夏生态环境状况公报》(2016—2020 年)显示,“十三五”期间宁夏境内黄河主要支流属中度污染状态,劣 V 类水质支流占 22.22%。主要湖库多属于轻度污染状态,V 类水质

的湖库占比 12.50%。主要入黄排水沟属中度或重度污染状态,2017 年 V 类及劣 V 类水质断面占比甚至高达 76.9%。“十四五”初期,在“控源截污、生态修复、末端提升”的治理思路下,自治区通过出台对应工作方案、全面推行河湖长制度等办法对水环境污染开展治理,使宁夏水环境状况有了极大改善。2022 年宁夏生态环境状况公报数据显示,沿黄重要湖泊(水库)水质总体良好,主要入黄排水沟水质全部达到或优于Ⅳ类。虽然,水生态环境治理工作取得了显著成效,但“十四五”国家对此提出了更高的要求,宁夏水生态环境保护工作迎来了更严峻的挑战。目前,黄河流域宁夏段水生态系统特征及水环境管理技术缺乏系统深入地研究,区域水生态系统服务功能分布格局尚未明确,也未建立“分区、分类、分级和分期”的管理体系,不利于实现黄河流域宁夏段水生态环境的有效保护。水生态功能区划通过对不同分区单元实行“分区、分级、分类、分期”的管理模式,可以确保整个流域的生态健康及水生态功能的正常发挥,从而实现流域水质安全及水生态完整性的管理目标^[1]。

尽管宁夏水环境监测起始于 1954 年,较全国其他地方起步较早,经过多年发展形成了较为完善的水环境监测体系,但水生态监测在监测目标、指标、点位、频次、评价方法、质量控制等方面与水环境监测大相径庭,其过程也涉及了多学科交叉、多时空尺度,需要用新的眼光来看待水生态监测。获取全面的水生态本底数据、设立客观代表水生态状况的监测断面(位点)、建立水生态监测指标体系、综合评价水生态等内容成为我区开展水生态监测工作中迫切需要解决的问题。

本研究通过调查黄河流域宁夏段水环境因子、水生生物两方面指标,对区域内水生态状况进行全面的评估。优化我区水环境监测网络,整合水生生物空间格局,筛选能够客观代表我区水生态状况的监测断面(点位)。构建黄河流域宁夏段水生态监测指标体系,进行水生态功能分区,综合评价黄河流域宁夏段水生态现状,为黄河流域宁夏段水环境质量改善、水生态保护提供科学依据和技术支撑。

1.3 主要内容

1. 水环境参数时空分布特征及空间异质性

根据现有国控、区控水质监测断面的布设情况,在黄河流域(宁夏段)(包括黄河干流、支流、湖泊、入黄排水沟道),定期采集水环境因子、表层沉积物理化因子,分析水体及沉积物 pH、氮、磷、电导率和盐度等环境因子的时空分布特征,探明环境因子的时空异质性。

2. 水生生物群落结构及多样性分析

根据现有国控、区控水质监测断面的布设情况,在黄河流域(宁夏段)(包括黄河干流、支流、湖泊、入黄排水沟道),定期采集浮游植物、浮游动物、底栖动物、细菌等水生生物数据,分析水生生物的时空分布特征,评估黄河流域(宁夏段)水生生物的多样性。

3. 栖息地综合指数及生物完整性指数构建

基于黄河流域（宁夏段）的土地利用类型、主要污染源的分布状况、自然环境、地理位置等因素，在现有的国控和区控点位基础上对干流、支流、湖泊和排水沟系布设监测点位，采集监测点位的栖息地底质、栖息地复杂性、堤岸稳定性、河道变化、河道水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地类型等指标的数据，构建黄河流域（宁夏段）监测点位的栖息地综合指数。

采样监测水环境因子，进行水质评分，结合栖息地综合指数，进行参照点的选取。采样监测水生生物包括浮游植物、浮游动物、底栖动物、浮游细菌，分析水生生物的种类、丰度、生物量、多样性等指标，构建水生生物完整性指数指标体系，依据参照点位，计算各监测点位的生物完整性指数。

4. 沉积物细菌群落结构及驱动因子

结合沉积物环境因子的时空异质性，并采用高通量测序技术对沉积物中的细菌群落结构和多样性进行研究，揭示微生物群落结构随季节演替的变化规律和驱动因子。根据黄河流域宁夏段沉积物环境因子的时空分布特征，利用微生物功能预测分析确定不同区域细菌群落结构和功能特点，构建细菌群落的共现网络，根据细菌的响应变化揭示沉积物生态环境的演变趋势。

5. 沉积物重金属时空异质性及风险评价

系统研究黄河流域宁夏段水体沉积物重金属，揭示黄河流域宁夏段水体沉积物重金属含量及其分布特征，分析黄河流域宁夏段水体沉积物重金属的污染来源，揭示黄河流域宁夏段水体沉积物重金属污染水平及主要的污染贡献因子，评价黄河流域宁夏段水体沉积物重金属污染风险及毒性风险。

6. 水生态监测指标体系构建及监测断面筛选优化

根据黄河流域（宁夏段）水生态特征和相关指标，筛选能够客观、公正、全面、科学地反映区域内水生态变化规律的指标，通过层次分析法等途径对筛选指标进行合理赋权并进行检验，从而完整地建立黄河流域（宁夏段）水生态监测指标体系。根据现有监测断面的布设情况，结合水质数据、栖息地质量、生物完整性指数等，综合利用系统聚类法、物元分析法等方法对监测断面进行优化，整合水生生物群落结构、数量动态、多样性变化等信息，筛选能够反映水生态状况的监测断面并进行验证，最终确定黄河流域（宁夏段）水生态监测断面。

7. 黄河流域宁夏段水生态功能分区

基于黄河流域宁夏段水体和表层沉积物环境参数的时空分布特征，以及水生生物群落的群落结构及多样性变化，建立黄河流域宁夏段水生态功能分区的指标体系和方法，完成黄河流域宁夏段水生态功能分区方案。

1.4 黄河流域（宁夏段）水生态环境数据采集与分析

1.4.1 样点布设与采样时间

1. 样点布设

依据研究目标，并结合黄河流域宁夏段的地理位置、水系分布特征、水文特征及水环境特点，在研究区内选取了 109 个断面，所选断面共覆盖了 56 个水域。依照《宁夏河湖管理“十三五”规划》中河道分级的标准，覆盖水域中非季节性自然河流 16 条（干流 1 条，一级支流 9 条，二级支流 6 条），非季节性排水沟 38 条（二级 1 条，三级 8 条，四级 14 条，五级 15 条）。为方便区分自然河流和人工水系，根据断面所处地理位置，将断面划分为黄河干流（YR）、清水河流域（QS）、苦水河流域（KS）、卫宁段沟系（WND）、青石段沟系（QSD）。

典型湖泊设置了 16 个采样点位。

断面/样点设置和具体信息见图 1-1 和表 1-1。

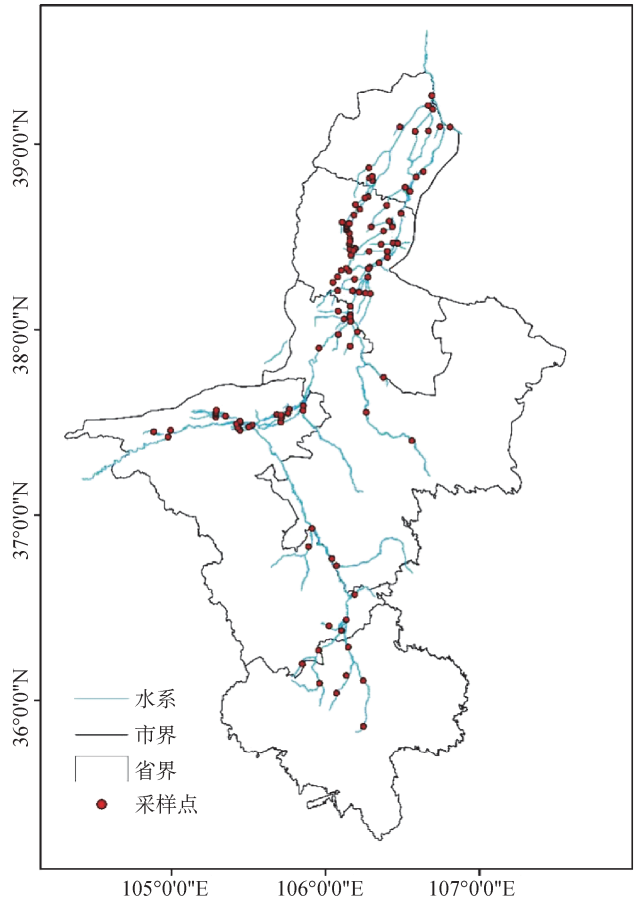


图 1-1 研究区采样点示意图

表 1-1 水系名称及采样点设置

区域	河流	区内河流长度/km	河流属性 1	河流属性 2	断面数量
黄河干流	黄河干流	397	黄河干流	非季节性河流	8
清水河流域	清水河	319	一级支流	非季节性河流	6
	冬至河	45.1	二级支流	非季节性河流	2
	中河	85	二级支流	非季节性河流	4
	菟麻河	80.4	二级支流	非季节性河流	1
	西河	122.9	二级支流	非季节性河流	1
	双井子沟	61.8	二级支流	非季节性河流	1
	折死沟	102	二级支流	非季节性河流	2
苦水河流域	苦水河	233	一级支流	非季节性河流	5
卫宁段沟系	长流水沟	26	一级支流	非季节性河流	1
	第一排水沟	37		非季节性排水沟	2
	中沟	15		非季节性排水沟	1
	第二排水沟	20		非季节性排水沟	1
	第三排水沟	21		非季节性排水沟	1
	第四排水沟	16		非季节性排水沟	1
	大佛寺沟	25	一级支流	非季节性河流	1
	倪丁大横沟	6.1		非季节性排水沟	1
	立新总沟	3.8		非季节性排水沟	1
	第五排水沟	8.8		非季节性排水沟	1
	第六排水沟	14		非季节性排水沟	1
	第九排水沟	18		非季节性排水沟	2
	红柳沟	106.6	一级支流	非季节性河流	2
	南河子沟	37		非季节性排水沟	1
	北河子沟	25		非季节性排水沟	2
	黄河大拜沟	5.7		非季节性排水沟	1
青石段沟系	反帝沟	22		非季节性排水沟	1
	罗家河	33.9		非季节性排水沟	2
	第一排水沟	11		非季节性排水沟	2
	第二排水沟	27		非季节性排水沟	2
	第三排水沟	80		非季节性排水沟	4
	典农河	68		非季节性排水沟	7
	第四排水沟	33		非季节性排水沟	2
	四二千沟	46		非季节性排水沟	1
	第五排水沟	70		非季节性排水沟	2
	第六排水沟	29		非季节性排水沟	1
	第七排水沟	12		非季节性排水沟	1
	银新沟	24		非季节性排水沟	2
	永二千沟	22		非季节性排水沟	2
	银东干沟	15		非季节性排水沟	2

续表

区域	河流	区内河流长度/km	河流属性 1	河流属性 2	断面数量
青石段沟系	永清沟	20	一级支流	非季节性排水沟	2
	中干沟	28		非季节性排水沟	2
	西大沟	13		非季节性排水沟	1
	金南干沟	15		非季节性排水沟	1
	清水沟	28		非季节性排水沟	2
	大河子沟	56		非季节性河流	3
	滨河大干沟	27		非季节性排水沟	1
	兵沟	16.2		非季节性河流	1
	水洞沟	73		非季节性河流	1
	双眼井沟	14.5		非季节性排水沟	1
	高仁干沟	11		非季节性排水沟	1
	马太沟	9.4		非季节性排水沟	1
	都思兔河	11		非季节性河流	1
典型湖泊	阅海湖				6
	沙湖				3
	鸣翠湖				6
	简泉湖				1

2. 采样时间

于 2019 年和 2021 年 4 月、7 月、10 月采集监测点位的栖息地底质、栖境复杂性、堤岸稳定性、河道变化、河道水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地类型等栖息地质量数据；采集各样点的水温（WT）、电导率（EC）、盐度（Sal）、溶氧（DO）、总溶解性固体（TDS）、总氮（TN）、氨氮（NH₃-N）、亚硝态氮（NO₂-N）、总磷（TP）、化学需氧量 Mn（COD_{Mn}）、化学需氧量 Cr（COD_{Cr}）、叶绿素 a（Chl a）、氟离子（F⁻）、硫酸根离子（SO₄²⁻）等水环境因子数据；采集浮游植物、浮游动物、底栖动物、浮游细菌、表层沉积物细菌等水生生物数据。

1.4.2 样品采集方法

为了全面体现每个监测断面的水生态现状，本研究在所有监测断面均采集了水质样品、沉积物样品、浮游植物样品、浮游动物样品、底栖动物样品、浮游细菌样品和沉积物细菌样品。

采样方法如下：

1) 水质样品

水样采集按照《水质采样技术指导（HJ494—2009）》《水质样品的保存和管理技术规定（HJ493—2009）》《水质采样方案设计技术规定（HJ495—2009）》中的要求进行。每次采样前，利用 GPS 记录断面经纬度信息，并记录采样点周围的主要情况。采样时

用蒸馏水清洗具塞棕色磨口瓶、聚乙烯塑料瓶及有机玻璃采水器。利用采水器在指定深度采集水样，混合均匀后装入采样瓶，拧紧盖子，贴上标签。每个水样采集 5L，4℃ 以下保存，8h 内送回实验室保存、处理。

2) 表层沉积物样品

使用彼得逊采泥器在采样断面分多处采集表层沉积物，混合均匀后取 1000g 装入自封袋中，贴好标签，记录采样时间、地点等，4℃ 以下保存，8h 内送回实验室保存、处理。

3) 浮游植物样品

浮游植物的标本采集包括定性和定量 2 种。定性样品用 25 号浮游生物网采集，现场加入 4% 甲醛溶液固定。定量样品用有机玻璃采水器采集不同深度的水样，将各层水样等量混合后，取 1L 装入聚乙烯采样瓶中，用 10~15mL 鲁哥试液固定。采样时，每瓶样品必须贴上标签，标签上要标明采集的时间、地点、采水体积等，其他详细内容另行做好记录。定性定量样品均低温、避光保存。

4) 浮游动物样品

浮游动物的标本采集包括定性和定量 2 种。定性样品用 25 号浮游生物网在水表面下拖取，约 5min 后将网徐徐提起，待水滤去后，将盛装标本的小瓶在网头下接好，使样品流入瓶中，加入 4% 甲醛溶液固定。定量水样用 5L 有机玻璃采水器采取不同深度的水样，等量混 20L 水，用 25 号浮游生物网过滤后，反复清洗后，用采样瓶收集过滤浓缩后的样品，并加入 4% 福尔马林固定。采样时，每瓶样品必须贴上标签，标签上要标明采集的时间、地点、采水体积等，其他详细内容另行做好记录。定性定量样品均低温、避光保存。

5) 底栖动物样品

底栖动物的标本采集也包括定性和定量两种采集方法。定性样品通过手抄网、0.42mm 的网筛等工具在河流岸边、石块表面、植物根垫、枯枝落叶和水草丛等小生境上扫网采集，将获得的底栖动物收集至广口采样瓶中，分次滴加 95% 乙醇，至虫体伸直后加入 4% 甲醛溶液固定。定量样品采用“D”形拖网法和采泥器抓取法，使用“D”形拖网采集时用脚或者手扰动网前底质，逆水流方向拖网 0.5~1m，提网后将网中拦截的较大杂质拣出，随后将网中所有的附着物转入自封袋内，贴好标签，记录采样地点、采样时间、网口大小及拖行距离。采泥器抓取法适合软质或细沙的河道采样，采集时打开彼得逊采泥器阀门，将采泥器沉入水底后，来回拉扯采泥器使采泥器切入底泥，随后提拉关闭阀门，最后将采泥器提出水面。采集到的底泥用 40 目分样筛（网孔直径 0.5mm）进行筛选，将筛选出的底栖动物放入广口采样瓶中，贴好标签，标明采样时间、采样地点及采泥器开口面积等，低温、避光保存，带回实验室。

6) 浮游细菌样品

采样前，消毒采水器、采样瓶、水舀等工具。利用采水器采集不同深度的水样，等量混合均匀后，灌装至 6L 无菌的聚乙烯取样瓶中，4℃ 保存，8h 内送回实验室保存、