

Research on the Characteristics of Water Quality Exceeding Standards at State-Controlled Sections of Xilin River and the Guarantee Program for Meeting the Standards

Haiyan Wang¹ Zhen Han^{1,2*} Jialin Wang^{2,3}

1. Water Conservancy Development Center of Luoyang, Luoyang, Henan, 471000, China

2. Department of Water Eco-Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China

3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi, 710048, China

Abstract

Water quality is a key indicator to determine the ecological health of grassland rivers. Based on the problem of meeting the water quality standard of the state-controlled cross section of Xilin River, a comprehensive field survey and water quality monitoring analysis were carried out to study the water quality differentiation and influencing factors. The results show that: 1) the water quality of the basin is generally good, but the water quality of the upstream cross-border section and the downstream urban river is poor, and the main pollution indicators are permanganate index and total nitrogen. 2) The water quality of the state-controlled cross section in March-April during the year was at the worst in the whole year, when $Q > 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ in the late spring flood, the pollution load accumulated in the previous period was reduced, and the concentration of pollutants was then significantly reduced. The results of the study can provide support for carrying out the refined management of the water environment of grassland rivers.

Keywords

watershed; water quality; state-controlled sections; Xilin River

锡林河国控断面水质超标特征及达标保障方案研究

王海岩¹ 韩祯^{1,2*} 王嘉林^{2,3}

1. 洛阳市水利事业发展中心, 中国·河南 洛阳 471000

2. 中国水利水电科学研究院, 中国·北京 100038

3. 西安理工大学, 中国·陕西 西安 710048

摘要

水质是决定草原河流生态健康的关键指标。基于锡林河国控断面水质达标问题, 综合野外调查及水质监测分析, 对水质分异及影响因素开展了研究。结果表明: ①流域水质总体较好, 但上游跨境断面及下游城市河道水质较差, 主要污染指标为高锰酸盐指数和总氮。②国控断面年内3—4月份水质处于全年最差, 当春汛后期 $Q > 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 前期累积的污染负荷有所减少, 污染物浓度随之显著降低。研究结果可为开展草原河流水环境精细化管理提供支撑。

关键词

流域; 水质; 国控断面; 锡林河

1 引言

草原河流是维系流域水源供给、流域社会经济发展和生态环境质量的重要支撑, 水质是反映草原河流生态系统健康状态的重要指标。由于草原河流水文过程特有的季节性和

区域性特点, 春季融雪径流与夏季降雨径流形成明显的双峰型地表径流特征^[1]。此外, 草原河流流域面积广大, 涵盖森林、草地、沙地、城镇等土地利用类型, 涉及畜牧、种植、工业、生活等不同类型人类活动, 对自然资源的高强度开发利用改变了流域的下垫面条件^[2], 加之草原河流流经林区、草地、沙地, 流域内土壤、沉积物及水体的本底状况尚不明确, 上述种种原因, 导致草原河流的水质时空分异显著, 变化成因复杂^[3]。根据以往研究^[4], 锡林河水质超标同时受到自然因素和上游以及人群、牲畜等影响, 因此如何从流域尺度出发, 以水文过程为纽带, 统筹陆地与水体, 模拟预测不

【作者简介】王海岩(1980–), 男, 工程师, 从事水利水电工程和生态环境保护研究。

【通讯作者】韩祯(1986–), 男, 中国山东枣庄人, 博士, 高级工程师, 从事流域水环境保护和湿地生态水文研究。

同水文情景、不同减排情景下的河流水质变化，据此开展基于考核断面水质达标的流域水环境精细化管理，是当前亟待解决的重要问题。

2 研究区概况

锡林河干流全长 175km，流域面积约 1.1 万 km²，是中国内蒙古典型的草原型内陆河。河流发源于赤峰市克什克腾旗，自东向西流经赤峰市和锡林郭勒盟，最后流入查干淖尔沼泽。其中，克什克腾旗境内河流长度为 50km，锡林浩特

市境内至锡林河水库段河流长度 93.3km，锡林河水库以下冲积平原段河流长度为 124.7km。锡林河水系及主要监测点位分布见图 1。

根据锡林浩特市生态环境监测站提供的 2018—2020 年水质监测数据，锡林河国控断面水质在 III 类与 IV 类间波动。从近 3 年数据来看（表 1），2018 共监测 10 次，满足 IV 类水质合计 8 个月，2019 年共监测 10 次，满足 IV 类水质合计 7 个月，2020 年共监测 7 次，全部满足 IV 类水质标准。主要污染指标为高锰酸盐指数、化学需氧量及五日生化需氧量。



制图单位：中国水利水电科学研究院

图 1 锡林河水系及监测点位

表 1 2018—2020 年锡林河国控断面水质类别

年/月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2018	断流/冰期	断流/冰期	IV	IV	III	III	IV	V	V	IV	IV	IV
2019	断流/冰期	断流/冰期	V	V	III	IV	V	III	III	IV	III	II
2020	断流/冰期	断流/冰期	IV	IV	III	—	—	IV	IV	IV	III	—

鉴于锡林河流域的水质不稳定问题，亟须对流域管控单元进行划分，针对控制断面水质超标状况，提出基于水质模型的人河总量超标溯源反演分析方法，并模拟预测不同水文情景、不同减排情景下的河流水质变化，研究成果可作为开展基于考核断面水质达标的流域水环境精细化管理的依据，有助于明确超标责任主体，并为排查、定责、排污许可等管理工作提供技术支持。

3 方法

3.1 控制单元划分

控制单元划分的原则主要包括水陆统筹原则、以乡镇为最小行政单元原则、流域完整性原则、与功能区衔接原则，

本研究采用定性分析和定量分析相结合的方法对控制单元进行划分及方案合理性验证。

3.2 污染负荷及水域纳污能力计算

3.2.1 流域面源污染负荷计算

根据流域内主要面源污染类型，将锡林河流域面源污染负荷分为 3 类：农村生活污染、化肥流失及畜禽养殖。本研究选取源强系数法对锡林河流域面源污染负荷进行估算。

①农村生活污染。

农村生活污染主要按农村人口数量和人均生活污染物产生系数及排放系数估算其污染物的产生量与排放量。计算公式如下：

$$W_{生c} = 365 \times N \times \alpha_{生c} \quad (1)$$

$$W_{生P}=365 \times N \times \alpha_{生P} \quad (2)$$

其中, $W_{生C}$ 、 $W_{生P}$ 为农村人口污染物产生量与排放量; N 为农村人口数量; $\alpha_{生C}$ 、 $\alpha_{生P}$ 为农村人口污染物产生系数与排放系数。根据 2012—2020 年锡林郭勒盟统计年鉴, 2020 年末锡林浩特市农村人口总数为 2.12 万人。农村生活污水产生系数、排放系数见表 2。

表 2 农村生活污水产生系数、排放系数 (单位: g/D/人)

污染物	产生系数	排放系数
化学需氧量	50.40	43.20
氨氮	6.16	6.00
总氮	8.48	7.52
总磷	0.59	0.52

②化肥流失。

化肥流失的估算是根据《入河污染物限排总量分解与控制关键技术研究》中的全国分区中的西北干旱半干旱地区的化肥流失量表 (见表 3), 按照《2021 年锡林郭勒盟统计年鉴》中锡林浩特市耕地面积为 17694hm², 计算得到锡林河流域 2021 年农业种植业污染物排放负荷。

表 3 化肥流失量 (单位: kg/亩)

所属分区	土地利用	种植模式	总氮	氨氮	总磷
西北干旱半干旱原区	旱地	大田一熟	0.008	0.001	0.002

③畜禽养殖量。

畜禽养殖污染负荷计算方法为:

$$W_{畜C}=365 \times N_{畜} \times \alpha_{畜C} \quad (3)$$

$$W_{畜L}=W_{畜C} \times \alpha_{畜L} \quad (4)$$

其中, $W_{畜C}$ 、 $W_{畜L}$ 为畜禽养殖污染物产生量与流失量; $N_{畜}$ 为各畜禽养殖量 (以牛、猪、羊、鸡为主); $\alpha_{畜C}$ 、 $\alpha_{畜L}$ 为污染物产生系数与流失系数。畜禽养殖总量根据《2021 年锡林郭勒盟统计年鉴》以全年年末存栏数 + 出栏数计。产生量与畜禽粪便流失率等指标如表 4 所示。

表 4 畜禽粪便流失率 (单位: %)

产污量	化学需氧量	氨氮	总氮	总磷
牛粪	6.16%	2.22%	5.68%	5.50%
猪粪	5.58%	3.04%	5.34%	5.25%
羊粪	5.50%	4.10%	5.30%	5.20%
家禽粪	8.59%	4.15%	8.47%	8.42%

④现状条件面源污染负荷总排放量及入河量。

根据水利部水规总院发布的《全国入河污染物限排总量分解与控制关键技术》: 西北诸河的入河系数为化学需氧量 3.4%、氨氮 4.6%、总氮 4.5%、总磷 4.9%。通过国控断面水质达标的面源污染负荷削减量试算, 上述入河系数化学需氧量入河系数偏小, 经过多次试算, 将其调整为 7.4%。锡林河入河系数调整为化学需氧量 7.4%、氨氮 4.6%、总氮 4.5%、总磷 4.9%。锡林河流域的年内径流主要集中在 4-8 月份, 结合此特征, 对 4 月和 8 月入河量进行调整即 4 月入

河量调整为月均值的 2.1 倍, 8 月入河量调整为月均值的 2.5 倍。根据排放量和入河系数计算得到面源污染负荷入河量。最后将各月份 (1、2、3、12 月冰封期末计算) 面源污染负荷入河量按子流域面积与行政区面积占比分配至各河段。

3.2.2 基于国控断面水质达标的面源负荷削减量

①水域纳污能力计算。

根据 GBT 25173—2010《水域纳污能力计算规程》, 污染物在河段横断面上均匀混合, 可采用河流一维模型计算水域纳污能力。

河段的污染物浓度计算:

$$C_x = C_0 \exp\left(-K \frac{x}{u}\right) \quad (5)$$

式中: C_x ——流经 x 距离后的污染物浓度, 单位为毫克每升 (mg/L);

x ——沿河段的纵向距离, 单位为米 (m);

u ——设计流量下河道断面的平均流速, 单位为米每秒 (m/s);

K ——污染物综合衰减系数, 单位为负一次方秒 (1/s)。

相应的水域纳污能力计算:

$$M = (C_S - C_X)(Q + Q_P) \quad (6)$$

式中: Q ——初始断面的入流流量, 单位为立方米每秒, m³/s;

Q_P ——废污水排放流量, 单位为立方米每秒, m³/s;

C_S ——水质目标浓度值, 单位为毫克每升, mg/L。

入河排污口位于计算河段的中部时 (即 $x=L/2$ 时), 水功能区下断面的污染物浓度及其相应的水域纳污能力分别计算。

$$C_{X=L} = C_0 \exp(-KL/u) + \frac{m}{Q} \exp(-KL/2u) \quad (7)$$

$$M = (C_S - C_{X=L})(Q + Q_P) \quad (8)$$

式中: m ——污染物入河速率, 单位为克每秒 (g/s);

$C_{X=L}$ ——水功能区下断面污染物浓度, 单位为毫克每升 (mg/L)。

对公式进行变形计算入河断面水质推算:

$$C_0 = \frac{C_{X=L} - \frac{m}{Q} \exp(-KL/2u)}{\exp(-KL/u)} \quad (9)$$

结合子流域划分结果与水质实际调查监测的断面布设情况, 将锡林河划分为 3 个河段。河段基本情况见图 2, 其中, 入境断面—东地断面河长 12.52km, 东地断面—漫水桥国控断面 69.56km, 漫水桥国控断面—水库河长 32.45km。

②相关参数确定。

设计流量采用 90% 保障率最枯月份平均流量。根据锡林浩特水文站 2006—2018 年水文数据, 通过 P-III 曲线计算锡林河 4-11 月 90% 保证率下的月流量。根据上述各月 90% 保证率条件下的月流量, 结合河道断面实地勘察和遥感影像结果, 得到各河段 4—11 月的平均流速。衰减系数 K 根据各河段入流与出流断面的实际监测值, 通过公式 (5) 计算。

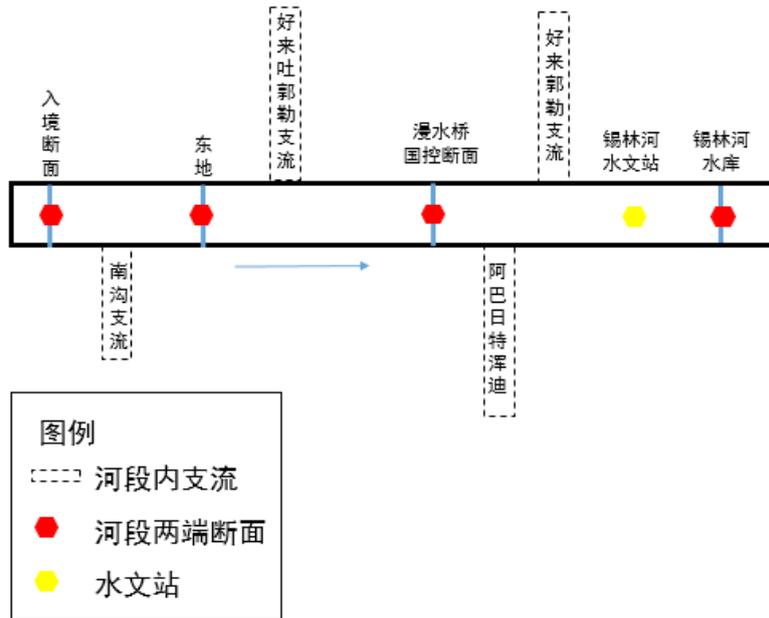


图2 河段概化示意图

3.3 国控断面水质达标情景污染负荷削减计算

对现状条件水质目标达到Ⅲ类情景进行模拟计算，估算得到各河段允许入河量，根据估算的面源污染负荷入河量与允许入河量，二者相减得到各河段的污染物削减目标。

4 结果

4.1 国控断面水质变化特征

从季节变化看，锡林河国控断面春季水质较差，夏、秋季水质相对较好。从月度变化看，年内3—4月份水体水质状况在全年处于最差水平。这一现象与锡林河流域的气象水文状况密切相关：流域水体在11月—次年3月处于冰封状态；春季气温回升后形成明显的融雪径流过程，污染物随融雪径流汇入河道，造成年内3—4月水体污染物浓度明显上升，随着水量达到峰值，污染物浓度有所降低。此外，锡

林河位于西北内陆干旱区，蒸发量远大于降水量（多年平均降水量为289mm，多年平均蒸发量为1903.5mm），除夏季“七下八上”产生的几场暴雨径流外，降水量整体较少，因此夏秋季污染入河量相对较少，水质状况好于春季。

锡林河国控断面的水质水量表现出明显非线性特征。以高锰酸盐指数为例（图3），虽然理论上汛期能够稀释污染物，但稀释作用具有一定阈值效应且与季节相关。当 $Q > 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ （5月6日，1.5 m^3/s ），此时处于汛期后期，前期累积的污染负荷有所减少，污染物浓度也随之显著降低；当 $Q < 1 \text{ m}^3/\text{s}$ （4月2日，12.4 mg/L ），此时处于污染负荷释放初期，稀释作用并不明显。夏季污染物浓度与流量呈现“此消彼长”的特征，当流量 $Q > 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ，表现出一定稀释效应；秋季流量较低，流量小幅增加并未显著降低污染物浓度。

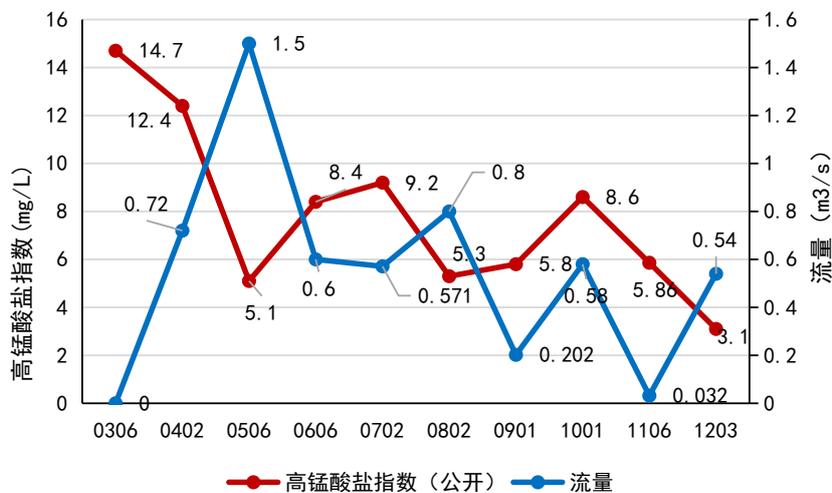


图3 高锰酸盐指数与流量关系曲线

4.2 污染负荷排放量及入河量估算

整体来看，畜禽养殖排放产生的污染负荷量占比最大，为96.71%，其次是农村生活污染和化肥流失，分别占比3.26%和0.02%；各项污染物中，化学需氧量占比最大，为90.92%，其次是总氮，占比5.97%。在面源污染负荷入河量方面，化学需氧量占比最大，为94.21%，其次是总氮，占比3.76%。

4.3 控制单元划分结果

通过控制单元划分，得到河段—子流域—行政区划的对应关系图表，见图4。根据划分结果，入境断面到东地断面主要对应白音锡勒牧场的污染负荷，东地断面到漫水桥国控断面主要对应白音锡勒牧场到贝力克牧场，漫水桥以下主要对应宝力根苏木和巴彦查干街道。



图4 锡林河流域控制单元

4.4 基于国控断面水质达标的减排量估算

入境断面—东地断面：COD 全年削减目标值为 9.90t/a，重点削减月份为 4、5、8 月；NH₃-N 全年削减目标值为 0.22t/a；TN 与 TP 全年减排压力相对较小。东地断面—漫水桥国控断面：COD 全年削减目标值为 61.63t/a，重点削减月份为 5 月；TN 全年削减目标为 0.67t/a；NH₃-N 与 TP 全年减排压力相对较小。漫水桥国控断面—水库：COD 全年削减目标值为 50.15t/a；TN 全年削减目标值为 0.96t/a，重点削减月份为 4、8 月；NH₃-N 与 TP 全年减排压力相对较小（图 5）。

5 讨论

5.1 流域各控制单元减排压力

锡林河上游赤峰市克什克腾旗入境水体水质状况较差，特别是区域交界处的南沟断面，主要超标因子为总氮和高锰酸盐指数。除 4 月和 11 月水质达标，其余时段均为 V 类或劣 V 类。河流进入锡林浩特市境后，沿程无工业企业排污口及重要城镇，人类活动影响很小，水质状况逐渐改善。

对照流域控制单元划分结果，白音锡勒牧场主要控制的污染物类型为 COD 和 TN，削减目标分别为 118.37t/年、

0.6t/年,8月份削减目标为各月最大,分别为29.54t/月和0.98t/月;贝力克牧场COD、TN全年减排压力较大,削减目标分别为11.41t/年、0.21t/年,且8月削减目标为各月最大值,分别为2.9t/月和0.088t/月;宝力根苏木COD、TN

全年减排压力较大,削减目标分别为3.54t/年、0.079t/年,且8月削减目标为各月最大值,分别为0.9t/月和0.028t/月;巴彦查干街道COD全年减排压力较大,削减目标为1.07t/年,且8月削减目标为各月最大值,为0.927t/月。

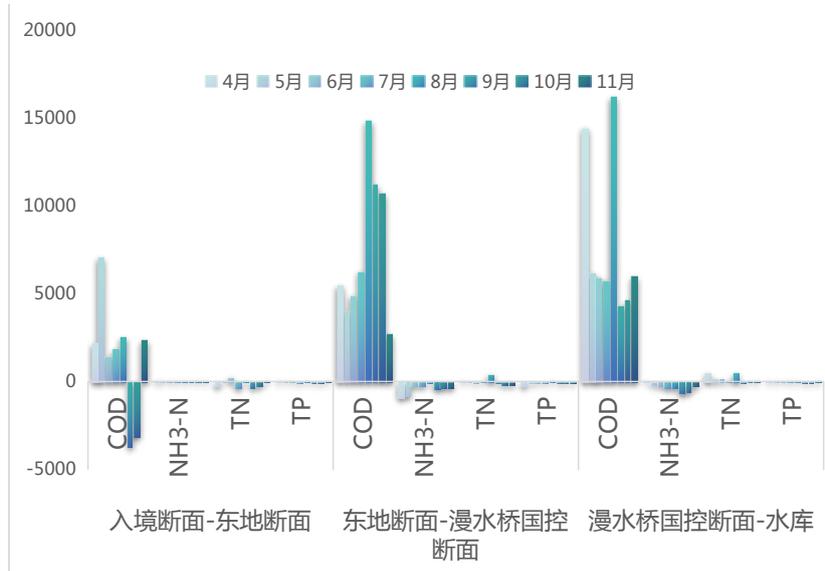


图5 国控断面Ⅲ类目标下各河段削减目标 (kg/月)

5.2 相关建议

管理机制方面,建议:①设置上游水体入境监测断面,推动建立流域上下游联动的“监控—预警—防治”体系。②以河长制为依托,以排污许可制度为抓手,强化河岸带畜禽养殖污染管理。③加快农牧村生活污水集中处理设施的建设,特别是锡林河干支流周边农牧村设施建设。

工程措施方面,建议:①针对跨境断面高污染问题,在上游1~3km河道布设近人工自然湿地,规划垂直流和水平流组合的人工湿地处理系统,发挥湿地对TN、TP和COD的去除效果^[6]。②针对融雪径流带来的春季水质超标问题,在3月下旬融雪过程开始前集中统一收集河滨带畜禽养殖粪便,减少污染负荷。

6 结论

①锡林河流域水质总体较好,但上游跨境断面及下游城市河道水质较差,主要污染指标为高锰酸盐指数和总氮。年内3—4月份水体水质状况在全年处于最差水平,当春汛后期 $Q>1.5\text{m}^3/\text{s}$,前期累积的污染负荷有所减少,污染物浓度随之显著降低。

②畜禽养殖排放产生的污染负荷量占比最大,为96.71%,其次是农村生活污染和化肥流失,分别占比3.26%

和0.02%;在面源污染负荷入河量方面,化学需氧量占比最大,为94.21%,其次为总氮,占比3.76%。

③以流域水文过程为纽带建立了河段、子流域及行政区划三者的对应关系,分区分类分期核算了水质达标约束下的削减量。其中,白音锡勒牧场、贝力克牧场、宝力根苏木和巴彦查干街道COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的减排压力较大,集中在8月和10月。

参考文献

- [1] 段超宇,张生,李锦荣,等.基于SWAT模型的内蒙古锡林河流域降水-径流特征及不同水文年径流模拟研究[J].水土保持研究,2014,21(5):292-297+341.
- [2] 张璐,朱仲元,王慧敏,等.锡林河流域水文干旱演变特征及影响因素分析[J].水土保持学报,2020,34(4):178-184+192.
- [3] 于鹏飞,韩祯,朱长军,等.锡林河流域水质时空分布特征研究[J].广西科学,2022,29(5):995-1002.
- [4] 张晓玲,乌亚汗.锡林河环境现状及水质评价[J].北方环境,2012,24(6):48-51.
- [5] 杨艳春,彭勃,刘桂丽,等.西北诸河区地表水水质评价[J].人民黄河,2011,33(11):93-96.
- [6] 任耀宗,刘国,余红,等.草原地区河流型天然湿地对河流水体污染物去除特性[J].环境工程技术学报,2019,9(2):181-187.