文章编号: 1672 - 3317 (2023) 06 - 0081 - 08

湟水流域典型区农业面源污染特征解析及空间格局

常晓敏^{1,2}, 王少丽^{1,2*}, 管孝艳^{1,2}, 黄佳盛³, 贾海峰³, 尤李俊^{1,2} (1.中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2.国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048; 3.青海省水利水电科学研究院有限公司, 西宁 810001)

摘 要:【目的】明确湟水流域农业面源污染排放的时空特征及污染贡献来源。【方法】采用排污系数法估算湟水 流域典型区 2010—2018 年总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、氨态氮(NH₃-N)的排放量和排放强 度,运用时空分析及冷热点分析揭示不同类型农业面源污染的时空演变及空间格局。【结果】从时间上看,来自畜 禽养殖和农村生活源的污染排放量呈上升趋势,来自种植业源的污染排放量呈下降趋势;从污染物排放类型来看, TN、COD、NH₃-N 排放量增加, TP 排放量减少;从空间分布上看,污染排放强度在峡门桥和金滩断面区域较小, 进入新宁桥后整体较高;排放负荷贡献率为畜禽养殖业>农村生活>种植业,其中 COD 为首要污染物。从冷热点 分析来看,热点区主要分布在桥头桥、新宁大通桥、西钢桥、西宁城东区,冷点区主要分布在金滩及三其桥区域, 污染物排放强度整体呈增加趋势,局部地区集聚程度减弱。【结论】湟水流域农业面源污染程度及主要污染来源具 有显著差异,应重点关注畜禽养殖业造成的面源污染,尤其需重视 COD 的减排;在重点防控区域方面,应重点关 注进入新宁桥断面后的区域。研究结果可为湟水流域农业面源污染治理提供理论依据。

关键词: 湟水流域; 农业面源污染; 时空演变; 冷热点分析; 防控对策 中图分类号: S276 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022468



常晓敏,王少丽,管孝艳,等. 湟水流域典型区农业面源污染特征解析及空间格局[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 81-88. CHANG Xiaomin, WANG Shaoli, GUAN Xiaoyan, et al. Spatiotemporal Distribution of Nonpoint Source Pollution from Agriculture in the Huangshui River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 81-88.

0引言

【研究意义】水环境污染主要来自点源和面源 2 种不同类型的污染物排放。随着点源污染的有效控制,面源污染逐渐成为水环境恶化的主要原因^[1-2]。 农业面源污染特征解析及空间识别是面源污染治理 的基础,通过污染物解析确定其主要来源及各来源 的贡献率,对于制定流域水环境污染防治策略具有重 要意义。【研究进展】研究表明,农业面源污染已成 为水体污染的重要污染源^[3],如何更好地控制面源 污染将是我国水环境保护面临的主要问题之一^[4-5]。 据统计,由氮、磷负荷造成的水体污染占据我国水体 总污染的 81%和 93%^[6]。《第二次全国污染源普查公 报》显示,2017 年农业排放源中的 COD、NH₃-N、 TN、TP 排放量分别占全国水污染物排放总量的 49.8%、22.4%、46.5%、67.2%,面源污染形势依旧 严峻[7]。定量评估面源污染排放量是污染特征解析的 基础,目前应用较多的评估方法有输出系数法^[8]、排 污系数法^[9]、监测法、模型法^[10]。【切入点】以往针 对面源污染特征解析的研究大多围绕单一种植区、 养殖区或特定降雨季节开展,关于典型区域农业面 源污染的时空异质性、污染物排放特征的长时间序 列解析、污染物排放局部聚集特征尚不多见。黄河 流域是中国重要的生态屏障,流域生态环境保护和 高质量发展已被列为国家重大战略。湟水河作为黄河 上游的重要一级支流和主要水源之一,其水质直接决 定下游地区的生态安全。《2017 年青海省环境状况 公报》指出,湟水河水质总体呈轻度污染状态^[11]。 由于流域存在种植、养殖和农村生活叠加污染的问 题,污染来源复杂且分布范围较广,污染负荷具有 较高的时空变异性^[12]。同时,种植业与畜牧养殖业 的发展规模在空间上存在一定错位,部分地区畜禽 粪便量超过了农田承载力。现有的湟水流域水环境 研究多集中在断面水质状况、水环境容量、污染物 削减与措施等方面, 而关于流域面源污染特征的定 量解析及污染源区的识别相对较少。【拟解决的关 键问题】鉴于此,本研究以湟水河小峡桥断面控制 区为研究区,基于 2021 年 6 月发布的《排放源统计

收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2023-01-17 网络出版日期: 2023-05-05 基金项目: 青海省应用基础研究项目(2021-ZJ-709); 国家自然科学基 金青年科学基金项目(52109073)

作者简介:常晓敏(1988-),女。高级工程师,博士,研究方向为农业 水土资源与环境。E-mail: changxm@iwhr.com

通信作者: 王少丽(1963-), 女。正高级工程师, 博士生导师, 研究方向为农田灌排理论与技术及农业水土环境保护研究。

E-mail: shaoliw@iwhr.com

^{©《}灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

调查产排污核算方法和系数手册》(以下简称 "《手册》")中的核算方法^[13],定量估算研究区 内不同单元 TN、TP、COD、NH₃-N 的排放量和排 放强度,分析其时空变化特征及污染物来源,探讨 各类污染物的排放强度,揭示研究区农业面源污染 的聚集规律,确定重点防控区域,为湟水流域水环 境治理提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湟水干流是黄河上游最大的一级支流,全长

374 km,流域总面积为 32 863 km²。湟水干流在青海省境内的干流长为 335.4 km,省内流域分布总面积为 16 224.36 km²,约占青海省总面积的 2.3%,干流控制流域内的人口数约为 296 万,占全省总人口数的 60%,流域内耕地面积为 29.39 万 hm²,占全省耕地面积的 49%。小峡桥断面是湟水河干流的出境断面,属于青海省人口集中且经济发达区域^[14]。本研究在全国控制单元、青海省"十三五"水环境控制单元划分、流域自然汇水边界以及行政单元边界的基础上,确定小峡桥断面控制区的分布,如图 1 所示。



图1 湟水河小峡桥断面控制区及子单元划分

Fig.1 Location of Xiaoxia bridge section of Huangshui River and division results of sub control units

1.2 数据来源

以乡镇为统计单元,研究区内涉及的各个区县 的乡镇作物播种面积、作物种植类型、作物产量、 化肥和农药施用量、畜禽养殖数量、农村人口等数 据来源于各区县 2010—2018 年国民经济及社会发展 统计资料;生活源及农业源的产、排污系数参考 《手册》^[13]。

2 研究方法

2.1 污染物负荷量估算

2.1.1 农村生活源

根据《手册》中的生活源污染物核算方法对农村生活源的污染物负荷量进行估算。青海省各地区农村生活污水的污染物产污强度、综合去除率参考生活污染源产、排污系数手册中的农村生活污水污染物产生与排放系数^[13]。青海省对生活污水进行处理的行政村比例来自《中国城乡建设统计年鉴》,2010—2018 年依次为 0.6%、1.0%、1.0%、1.2%、1.2%、1.3%、6%、6%、7.56%。

2.1.2 种植业源

1) 化肥

种植业污染物(NH₃-N、TN、TP)排放量采用 《手册》中的产、排污系数法核算^[13]。研究区内乡 镇化肥施用量数据来源于各县统计局,化肥施用量 均为折纯量。青海省种植业的氮、磷排放系数参考 农业污染源产、排污系数手册中的种植业氮、磷排 放系数。由于缺少园地面积数据,且该类面积的比 例较少,因此只考虑农作物的总播种面积,TN、TP、 NH₃-N 流失系数分别为 0.225、0.016、0.016 kg/hm²。

2)作物秸秆

秸秆的面源污染物负荷排放量=秸秆污染物的产 生量、秸秆面源污染物排放系数。其中,秸秆污染物 的产生量=作物产量、秸秆与作物产量比值、秸秆产污 系数。青海省主要农作物包括小麦、玉米、豆类、 薯类、油料作物。各类作物秸秆的 TN、TP、COD 产污系数参考该地区以往研究成果^[15],小麦、豆类、 玉米、薯类和油料作物对应的秸秆与作物产量比值 分别为 0.97、1.03、1.71、0.61 和 3.0。

青海省秸秆资源利用主要以秸秆能源化、饲料 化、秸秆还田、食用菌基料为主,未被利用的秸秆 主要包括未收集与弃置乱堆的部分,其中未收集部 分可假定为还田处理。本研究忽略能源化、饲料化、 食用菌基料等利用方式的排污。作为肥料还田时的 COD、TN、TP 排放系数分别为 20%、10%和 5%, 弃置乱堆类秸秆的 COD、TN、TP 排放系数均为 50%^[15]。秸秆利用现状比例参考已有研究成果^[15], 秸秆能源化、过腹还田、食用菌基料、秸秆还田、 弃置乱堆量占秸秆总产量的比例分别为 17%、38.8%、 1.76%、27.64%、19.41%。

2.1.3 畜禽养殖业源

畜禽养殖业污染物的产生量和排放量均采用《手 册》中的产、排污核算法计算^[13]。青海省规模化养殖 场和养殖专业户的排污系数参考农业污染源产、排污 系数手册中的畜禽养殖排污系数。由于不同养殖处理 粪便的方式、配套措施、饲养环境有所差别,因此排 放系数的影响因素各异。本研究假设马、驴、骡均为 放养,其他畜禽养殖方式参考文献[15]中的青海省畜 禽养殖方式构成比例。《手册》中只给出了规模养 殖场和养殖户的产、排污系数,未区分放养和散户, 本研究中散户产、排污系数参考养殖专业户的调查 结果取值,放养产、排污系数参考规模养殖场和养 殖户的平均值。猪、肉牛、家禽的饲养量为当年的 出栏量,奶牛、羊、马、驴、骡的饲养量为年末存 栏量。马、驴、骡的污染物产污系数及排放系数参

2.2 冷热点分析

冷热点分析是一种空间聚类方法,可展现指标的 高值和低值空间聚集分布规律,并弥补全局空间自相 关和自然断点分级对空间特征分析的不足,已应用于 生态系统服务价值空间异质性及面源污染空间分布格 局研究中。具体计算方法参考文献[16]。

利用 ArcGIS 冷热点分析工具,在冷热点分布图 属性表中生成具有统计学意义的 Z 值和 P 值。按照 Z 值划分出 3 个热点区、3 个冷点区、1 个不显著区。 划分依据为一级冷点区(Z<-2.58),即 99%置信区 间;二级冷点区(-2.58<Z<-1.96),即 95%置信区 间;三级冷点区(-1.96<Z<-1.65),即 90%置信区 间;不显著区(-1.65<Z<1.65);一级热点区



(Z>2.58),即 99%置信区间;二级热点区 (1.96<Z<2.58),即 95%置信区间;三级热点区 (1.65<Z<1.96),即90%置信区间。

3 结果与分析

3.1 面源污染时间变化

2018 年, TN、TP、COD、NH₃-N 的排放量分 别为 2 204.11、301.42、48 716.09、544.33 t/a, TN、 COD、NH3-N 排放量比 2010 年增加了 5.3%、8.4%、 10.4%, TP 排放量比 2010 年减少了 7.2% (表 1)。 由图 2 可知, 2010-2018 年, 来自种植业污染源的 TN、TP、COD、NH₃-N 排放量分别降低了 18.39%、 9.8%、22.7%、0.24%,主要原因是随着绿色高效种 植技术的推广,区域内种植业污染排放量显著降低。 来自畜禽养殖业污染源的 TN、COD、NH3-N 排放 量分别增加了 9.65%、11.29%、15.91%, 而 TP 排放 量降低了 8.61%。其中,牛、羊养殖是畜禽养殖业 污染中最主要的污染源,在TN、TP、COD、NH₃-N 的总排放量中,牛和羊养殖业的贡献率分别为 49.89% 和 15.50%、36.89%和 23.95%、63.14%和 9.46%、 33.67%和 17.30%。来自农村生活污染源的 TN、TP、 NH₃-N 排放量分别增加了 3.42%、2.69%、3.08%, COD 排放量降低了 0.35%。整体来看,流域面源污 染与产业发展结构密切相关,研究区 TN、COD、 NH₃-N 排放量呈增加趋势,TP 排放量减小,农业面 源污染排放量总体呈增长趋势,其中 TN 排放量是 TP 的 7 倍,以往研究也指出 TN 与 TP 污染负荷量 之比在 5~10之间[17]。







表 1 为 2018 年 16 个子单元各类污染物排放量 及贡献率。从污染源结构来看,排放贡献率由高到 低依次为: 畜禽养殖业>农村生活>种植业, 畜禽 养殖污染对 TN、TP、COD、NH3-N 的排放贡献率 分别为 73.54%、79.55%、78.20%、59.78%, 农村 生活对 TN、TP、COD、NH₃-N 的排放贡献率分别 为 17.65%、13.79%、21.54%、39.77%,种植业对 TN、TP、COD、NH₃-N的排放贡献率分别为 8.81%、6.66%、0.27%、0.45%,研究区的首要污染 源为畜禽养殖业。就面源污染指标而言, COD 是研 究区的首要污染物,占总排放量的比例为 94.09%, TN、TP、NH3-N 占总排放量的比例分别为 4.26%、 0.60%、1.05%。这与以往研究^[15]结论一致。鉴于此, 研究区农业面源污染治理应将重点放在畜禽养殖业 上,尤其应重点关注 COD 的减排,加强散户畜禽废 污水中 COD 的去除。

从空间分布来看,位于湟水干流下游的西钢桥、桥头桥控制区农村人口多、农业畜牧业发达,由此带来的面源污染排放量较大。西钢桥子单元污染排放总量最高,TN、TP、COD、NH₃-N 排放量分别为558.61、77.91、11 725.96、119.51 t/a。因此,靠近西钢桥区域的农业面源污染不容忽视。西宁四区位于市区,经济发达,人口稠密,随着城市化建设的加快,农业种植面积及畜禽养殖量减少,农村生活

源成为该单元的主要污染源,对应的 TN、TP、 COD、NH₃-N 排放量占比分别为 79.02%、73.59%、 81.81%、88.33%。

在乡镇尺度上对 2010 年和 2018 年不同污染物排 放强度进行了对比,因 4 类污染物排放强度存在差异, 排放强度等级划分也有所不同。由图 3 可知,TN、 TP、COD、NH₃-N 在 2010 年的平均排放强度分别为 282.85、44.68、6 037.39、64.84 kg/km²,2018 年的 平均排放强度分别为 289.74、41.26、6 418.91、66.35 kg/km²。整体来看,TN、COD、NH₃-N 排放强度 呈增加趋势,TP 排放强度呈减小趋势。

4 类污染物排放强度分布较为集中,在峡门桥 和金滩断面上游排放强度整体较小,进入西宁城区 的新宁桥断面单元的排放强度整体较高。2010年, TN 排放强度最高区域主要分布在大通县良教乡和石 山乡;2018年新增了大通县新庄镇、塔尔镇、多林 镇。2010年,TP 排放强度最高区域主要分布于大通 县多林镇、塔尔镇、石山乡以及湟中县汉东乡; 2018年新增了大通县斜沟乡和良教乡。2010年, COD 排放强度最高区域主要分布于大通县良教乡、 石山乡;2018年新增了大通县新庄镇和西宁城中区。 2010年,NH₃-N 排放强度最高的区域主要分布于大 通县城关镇、塔尔镇、良教乡、石山乡、长宁镇以 及湟中县汉东乡和多巴镇,2018年新增了大通县多 林镇。以上乡镇可作为研究区的污染重点治理区。

吊玩戟 寺: 住小仉以兴至匕巜业囬你乃朱付征胜忉及工问俗	常晓敏	等:	湟水流域典型区农业面源污染特征解析及空间格员
------------------------------	-----	----	------------------------

表 1 2018年研究区不同控制单元农业面源污染排放量及贡献率

Table 1 Emissions and contribution rate of agricultural non-point source pollutants from different control units in the study area in 2018

污染指标		种植业源		畜禽养殖业源		农村生活源		合计
	控制于甲元	排放量/(t a ⁻¹)	占比/%	排放量/(t a ⁻¹)	占比/%	排放量/(t a ⁻¹)	占比/%	排放量/(t a ⁻¹)
TN	金滩(HB)	1.58	1.33	115.52	97.32	1.60	1.35	118.71
	扎马隆 (HY)	21.65	6.49	287.47	86.19	24.41	7.32	333.53
	三其桥 (HHZ)	14.21	8.17	124.75	71.77	34.86	20.05	173.81
	峡门桥 (DT1)	17.00	5.28	292.36	90.77	12.73	3.95	322.09
	桥头桥(DT2、DT3)	54.71	14.94	259.55	70.86	52.02	14.20	366.28
	新宁大通(DT4)	20.72	11.74	116.50	65.98	39.35	22.29	176.57
	西钢桥 (HZ)	62.01	11.10	394.64	70.65	101.95	18.25	558.61
	西宁四区 (HNN)	2.27	1.47	30.15	19.51	122.10	79.02	154.52
	合计	194.15	8.81	1 620.93	73.54	389.03	17.65	2 204.11
TP	金滩 (HB)	0.15	0.70	20.73	98.33	0.20	0.97	21.09
	扎马隆 (HY)	3.29	6.39	45.59	88.45	2.66	5.17	51.55
	三其桥 (HHZ)	1.16	4.09	23.01	81.24	4.16	14.67	28.33
	峡门桥(DT1)	1.69	3.97	39.46	92.76	1.39	3.26	42.54
	桥头桥(DT2、DT3)	5.23	10.82	37.42	77.44	5.67	11.74	48.32
	新宁大通(DT4)	2.00	8.82	16.41	72.28	4.29	18.90	22.71
	西钢桥 (HZ)	6.95	8.92	59.84	76.81	11.12	14.27	77.91
	西宁四区(HNN)	0.22	1.19	4.56	25.22	13.32	73.59	18.10
	合计	20.68	6.66	247.04	79.55	42.82	13.79	310.54
COD	金滩 (HB)	0.97	0.04	2 501.68	97.16	72.23	2.81	2 574.88
	扎马隆 (HY)	17.64	0.25	6 415.93	90.78	634.17	8.97	7 067.74
	三其桥 (HHZ)	4.39	0.12	2 430.65	65.76	1 260.96	34.12	3 696.00
	峡门桥(DT1)	12.85	0.16	7 705.07	95.73	330.77	4.11	8 048.70
	桥头桥 (DT2、DT3)	31.46	0.40	6 435.62	82.31	1 351.37	17.28	7 818.45
	新宁大通(DT4)	14.98	0.38	2 870.44	73.46	1 022.30	26.16	3 907.72
	西钢桥 (HZ)	47.88	0.41	9 029.62	77.01	2 648.45	22.59	11 725.96
	西宁四区(HNN)	0.41	0.01	704.56	18.17	3 171.67	81.81	3 876.64
	合计	130.58	0.27	38 093.58	78.20	10 491.93	21.54	48 716.09
NH3-N	金滩 (HB)	0.03	0.06	51.83	98.78	0.61	1.16	52.47
	扎马隆 (HY)	0.28	0.26	95.58	87.12	13.85	12.62	109.71
	三其桥 (HHZ)	0.62	1.53	24.16	59.43	15.87	39.04	40.65
	峡门桥(DT1)	0.14	0.35	33.68	82.05	7.22	17.60	41.04
	桥头桥(DT2、DT3)	0.42	0.65	34.48	53.53	29.51	45.82	64.41
	新宁大通(DT4)	0.19	0.49	15.62	40.96	22.32	58.55	38.13
	西钢桥 (HZ)	0.72	0.60	60.97	51.01	57.83	48.39	119.51
	西宁四区 (HNN)	0.04	0.05	9.11	11.62	69.26	88.33	78.41
	今计	2 44	0.45	325 42	50.78	216.46	20.77	544 33



Fig.3 Distribution of TN, TP, COD and NH₃-N emission intensity of agricultural non-point source in Xiaoxiaqiao section control area

3.3 冷热点格局分析

由于区域间污染物排放强度差异较大,排放强 度可能呈一定的空间集聚特征,为了进一步探究研究 区面源污染集聚特征,利用冷热点分析法对 2010 年 和 2018 年的 4 类污染物冷热点空间格局进行分析。 由图 4 可知,不同污染物排放强度空间格局呈局部 聚集性特征,TN、TP、COD 排放量呈较为明显的 空间溢出效应,DT2、DT3、DT4 区域表现为空间 连片的集聚性污染。TN、TP、COD 排放量热点区 主要分布在大通县的桥头桥(DT2、DT3)及新宁大 通桥(DT4)区域,冷点区主要分布在海晏县的金 滩(HB)及互助土族自治县的三其桥(HHZ)区域 的部分乡镇。NH₃-N 排放量热点区主要分布在湟中 县的西钢桥(HZ2)、新宁大通桥(DT4)、西宁城 东区(XNN4)部分乡镇,冷点区分布范围与TN、 TP、COD 一致,但涉及乡镇面积较大。主要原因是 大通县牛羊养殖量较大,种植业较为发达; 湟中县 的西钢桥区域位于西宁人口聚集区,经济发达,污 染排放量较多,互助县种植业较为发达,近年来化 肥零增长政策驱动、种植结构调整、经营方式转变 使得种植业污染治理取得一定成效;海晏县地广人 稀,单位面积的化肥施用量、畜禽养殖量和农作物 种植面积均较低,承载污染负荷能力相对较强,该区 域污染程度差异性较小。其他地区污染物排放强度差 异不大,未能形成明显的聚集特征,为不显著区。

整体来看,区域污染物排放强度呈轻微增加趋势,但局部地区污染聚集程度有所下降,热点区面积减少,冷点区面积增加。尽管整体上污染物排放量和排放强度有所增加,但随着生态文明建设的推进,各地区污染物得到治理,局部地区污染程度的差异性有所降低,聚集程度减弱。



agricultural non-point source pollution in Xiaoxiaqiao section control area

4 讨 论

近年来,农业面源污染防控已成为我国农业工 作的重点,由于受特定地域的自然条件、地形地貌、 产业结构等多因素的综合影响,农业面源污染产生 和迁移具有不同的分布特征,污染关键源区也不同。 基于区域异质性的农业面源污染定量解析及空间格 局研究更有利于区域污染治理策略的制定。

面源污染定量估算是污染特征解析的基础,关 于农业面源污染估算方法较多,为规范排放源产、 排量核算方法,统一产、排污系数,2021年6月生 态环境部编制的《手册》包含了农业源产、排污核 算方法和系数。本文采用该手册核算法对研究区不 同污染源排放量进行了核算,核算结果与第二次全 国污染源普查^[18]、2015 年《中国环境年鉴》数据^[19]、 黄河流域等相关研究结果一致^[20]。《青海省第二次 全国污染普查》指出^[21],全省畜禽养殖业各类污染 物排放量占农业源排放量的比例高达 90%,其中牛 羊是畜禽养殖污染中最重要的污染源,这与张藤丽 等^[22]研究结论一致。

畜禽养殖是湟水流域的首要污染源,因地制宜 提出相应的防控措施十分必要。当前青海省畜禽养 殖污染物处理的难点主要集中在区域性大量小规模 的散养户。已有数据表明,青海省畜禽养殖业废水 污染物削减率普遍较低,尤其是规模以下畜禽养殖 户的废水污染物削减率仅为 75.22%~86.69%,低于 全省平均水平^[21]。因此,应加强规模以下畜禽养殖 户的粪污收集、处理、资源化利用水平,建议推广 "分散收集、集中处理"的模式。具体可采用固液 分离处理技术降低畜禽排污水 COD,其中絮凝分离 技术方法简单、成本低廉,在青海省较为适用^[23]。 在未来发展中,农牧融合、平衡种植养殖模式有望 成为热点,农村散养的农户根据周围土壤与种植业 的实际承载量合理布局畜禽的养殖规模,配套粪污 处理设施,让畜禽的粪便和养殖污水经过无害化处理 后再次还田利用,真正实现种养良性生态循环^[24]。

5 结 论

1) 从时序变化来看,2010—2018 年研究区来 自种植业污染源的排放量减小,来自畜禽养殖源和 农村生活源的排放量增加;TN、COD、NH₃-N 排放 量及排放强度总体呈增加趋势,TP 减少。

2) 从空间变化来看,4 类污染物排放强度分布 比较集中,在峡门桥和金滩断面上游单元整体较小, 北川河支流从峡门桥断面开始进入到新宁桥断面单 元整体较高;从污染源结构来看,排放贡献率为畜 禽养殖业源>农村生活源>种植业源;就面源污染 指标而言,COD 是研究区的首要污染物。

3)从冷热点空间格局来看,4 类污染物冷热点空间格局呈局部集聚性分布特征,区域污染物排放强度整体呈轻微增加趋势,但局部地区污染程度的聚集程度有所减弱。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- ZOU L L, LIU Y S, WANG Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978–2017[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110 400.
- [2] GUO W X, FU Y C, RUAN B Q, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 254-261.
- [3] BOUWMAN L, GOLDEWIJK K K, VAN DER HOEK K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20 882-20 887.
- [4] SHEN Z Y, LIAO Q, HONG Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 104-111.
- [5] YU C, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019, 567(7 749): 516-520.
- [6] 任军,边秀芝,郭金瑞,等.我国农业面源污染的现状与对策 I.

农业面源污染的现状与成因[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(2): 48-52. REN Jun, BIAN Xiuzhi, GUO Jinrui, et al. Current status and countermeasures of agricultural non-point source pollution in China: I current status and causes of agricultural non-point source pollution[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2010, 35(2): 48-52.

- [7] 中华人民共和国生态环境部,国家统计局,农业农村部.第二次全国 污染源 普查公报 [EB/OL]. 2020-06-09 [2022-05-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_78 3547. html
- [8] 刘增进,张关超,杨育红,等.河南省农业非点源污染负荷估算及空间分布研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(11):1-6. LIU Zengjin, ZHANG Guanchao, YANG Yuhong, et al. Estimation and spatial distribution of agricultural non-point source pollution loads in Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 1-6.

 [9] 董红敏,朱志平,黄宏坤,等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算 方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303-308.
 DONG Hongmin, ZHU Zhiping, HUANG Hongkun, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 303-308.

- [10] YANG S T, DONG G T, ZHENG D H, et al. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(20/21/22): 3 701-3 717.
- [11] 青海省生态环境厅.青海省 2017 年环境状况公报[EB/OL].
 [2018-06-04]. https://sthjt.qinghai.gov.cn/hjzl/qhssthjzkgb/201806/ t20180604_91581. html.
- [12] 王康, 冉宁, 张仁铎, 等. 流域面源污染负荷差异性及不确定性的尺度特性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 211-218.
 WANG Kang, RAN Ning, ZHANG Renduo, et al. Analysis on characterization of heterogeneities and uncertainty for non-point source pollution loads at different basin scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 211-218.
- [13] 中华人民共和国生态环境部.《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》(以下简称《手册》[EB/OL]. 2021-06-11[2022-05-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202106/t20210618_83 9512.html.
- [14] 贾紫牧,陈岩,王慧慧,等. 流域水环境承载力聚类分区方法研究:
 以湟水流域小峡桥断面上游为例[J]. 环境科学学报,2017,37(11):
 4 383-4 390.
 JIA Zimu, CHEN Yan, WANG Huihui, et al. A study on the clustering

zoning method for water environmental carrying capacity in the watershed scale: Analysis exploring the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(11): 4 383-4 390.

[15] 陶园, 王少丽, 管孝艳, 等. 青海省农业面源污染源特征分析[J]. 农业 工程学报, 2019, 35(10): 164-172.
TAO Yuan, WANG Shaoli, GUAN Xiaoyan, et al. Characteristic analysis of non-point source pollution in Qinghai Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 164-172.

- [16] 卢少勇,张萍,潘成荣,等.洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对 策研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2 278-2 286.
 LU Shaoyong, ZHANG Ping, PAN Chengrong, et al. Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake[J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2 278-2 286.
- [17] 袁远,石蒙蒙,李会平,等.基于 SWAT 模型的北汝河流域非点源 污染及其关键区域识别[J]. 灌溉排水学报,2020,39(1):115-122. YUAN Yuan, SHI Mengmeng, LI Huiping, et al. Using SWAT model to analyze non-point pollution in beiru river basin[J]. Journal of Irrigation

and Drainage, 2020, 39(1): 115-122.

[18] 胡钰,林煜,金书秦.农业面源污染形势和"十四五"政策取向——基于两次全国污染源普查公报的比较分析[J].环境保护,2021,49(1):31-36.

HU Yu, LIN Yu, JIN Shuqin. Agricultural non-point source pollution situation and the policy orientation of the tenth five-year plan: Based on the comparative analysis of two communiqués of national pollution source survey[J]. Environmental Protection, 2021, 49(1): 31-36.

- [19] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴-2015[M]. 北京: 中国 环境年鉴社, 2015.
- [20] 王思如,杨大文,孙金华,等. 我国农业面源污染现状与特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 140-147, 172.
 WANG Siru, YANG Dawen, SUN Jinhua, et al. Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 140-147, 172.
- [21] 青海省生态环境厅.青海省第二次全国污染源普查公报[EB/OL].
 2020-09-22[2022-05-12].https://sthjt.qinghai.gov.cn/xwzx/xydt/202009/

t20200922_110496.html.

[22] 张藤丽, 焉莉, 韦大明. 基于全国耕地消纳的畜禽粪便特征分布与 环境承载力预警分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 745-755.

ZHANG Tengli, YAN Li, WEI Daming. Characteristic distribution of livestock manure and warning analysis of environmental carrying capacity based on the consumption of cultivated land in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 745-755.

- [23] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源 化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1 168-1 176.
 WU Haowei, SUN Xiaoqi, LIANG Bowen, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1 168-1 176.
- [24] WU H S, GUO D J, MA Y, et al. Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(2): 163-168.

Spatiotemporal Distribution of Nonpoint Source Pollution from Agriculture in the Huangshui River Basin

CHANG Xiaomin^{1,2}, WANG Shaoli^{1,2*}, GUAN Xiaoyan^{1,2}, HUANG Jiasheng³, JIA Haifeng³, YOU Lijun^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China;

3. Qinghai Water Conservancy and Hydropower Research Institute Co., Ltd, Xining 810001, China)

Abstract: [Objective] Huangshui River is a tributary of the Yellow River in China, located in Qinghai. Agricultural production has resulted in pollution to it. The purpose of this paper is to analyze the spatiotemporal evolution of nonpoint source pollution due to agriculture in this basin. [Method] The studied area is located at the upstream in the Xiaoxiaqiao section in the mainstream of the river. Data measured from 2010-2018 from 16 sub-units in the section were used for analysis. Pollutant discharge coefficient method was used to estimate the discharge amount and intensity of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen (NH₃-N). Spatiotemporal analysis and cold-hot spot analysis were used to analyze the spatiotemporal evolution of these pollutants. [Result] Temporally, pollutant discharge from livestock and poultry breeding and rural areas had showed an increasing trend, while those from crop farming had exhibited a decreasing trend. The discharge and intensity of TN, COD and NH₃-N had increased, while TP had decreased slightly. Spatially, discharge of the four pollutants was less in Xiameng Bridge and Jintan cross-section areas, and more in the Xinning Bridge section. The contribution from different sectors to the pollution was ranked in the following order based on their significance: livestock and poultry breeding source > rural areas > farmland, with COD being the primary pollutant. Cold-hot spot analysis showed that the hot spots are mainly in Qiaotou Bridge, Xinning Datong Bridge, Xigang Bridge and the east of Xining, while the cold spots are mainly in Jintan and Sanqi Bridge. Overall, pollutant discharge had increased slightly in the basin, despite some areas having seen a decrease in pollution. Prevention and control of the pollutants should focus on reducing discharge from livestock and poultry breeding industry, especially COD, and reducing discharge of the pollutants into the Xinningqiao Section. [Conclusion] Nonpoint source pollution from agriculture in Huangshui basin varied spatiotemporally, and the main contributors to the pollution are livestock and poultry breeding sector. Reducing and mitigating their discharge is hence essential to ameliorate pollution of the basin.

Key words: Huangshui River Basin; agricultural non-point source pollution; temporal and spatial evolution; cold and hot spot analysis; prevention and control countermeasures