

广利灌区总干渠水质及氮磷污染初步评价

谷少委^{1,2}, 刘杰云¹, 范习超¹, 秦京涛¹, 忠智博^{1,2}, 吕谋超^{1*}, 高剑民³

(1.中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业农村部节水灌溉工程重点实验室,

河南 新乡 453002; 2.中国农业科学院 研究生院, 北京 100081;

3.连云港市通榆河北延送水工程管理处, 江苏 连云港 222000)

摘要: 【目的】针对灌区绿色发展面临严峻挑战和水环境不断恶化等问题, 探究广利灌区总干渠水质及氮磷污染现状及其对灌区水环境的影响, 进一步提出灌区水环境问题建议。【方法】于2019年6—12月, 在灌区内总干渠中选取具有代表性的6个断面, 进行了6次水质监测, 测定水体中的总氮(TN)、总磷(TP)、COD_{Cr}和BOD₅等反映水质和氮磷污染的基本指标。采用适用于我国河流水质综合评价的综合水质标识指数法和富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式对河流水质及富营养化情况进行评价。【结果】①广利灌区86%的水体水质能满足V类农业水域功能区的用水要求, 且综合水质标识指数随时间和空间变化显著, 7月66.7%水体处于劣V类水标准, 在三号闸和补源进水口取样点出现了黑臭水体。②广利灌区水体富营养化严重, 灌区内水体100%处于富营养状态, 富营养化评价综合指数(EI)峰值出现在7月补源进水口处(80.5), 且41.6%的水体处于重富营养化状态。③TN平均质量浓度为5.30 mg/L, 为地表水V类水标准的2.65倍, TP平均质量浓度为0.156 mg/L, 氮、磷比为33.97:1, 适宜藻类生长。【结论】广利灌区总体水质可满足农业功能区用水要求, 但富营养化水平较高, 尤其是氮污染严重, 灌区内的原生态土渠和水生植物使河流具有良好的自净能力, 能发挥其生态功能作用。因此, 建议加强灌区内入河水体的污染控制尤其是氮磷污染的监测; 同时渠道衬砌要考虑生态环境、配比生态衬砌和原生态土渠、河道搭配水生植物, 进而对河水中的氮磷等污染物进行吸附, 以改善灌区水环境。

关键词: 灌区; 总干渠; 水质; 氮磷污染; 富营养化

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020265

OSID:



谷少委, 刘杰云, 范习超, 等. 广利灌区总干渠水质及氮磷污染初步评价[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 93-100.

GU Shaowei, LIU Jieyun, FAN Xichao, et al. A Preliminary Analysis of Water Quality and Nitrogen and Phosphorus

Pollution in the Main Canal of Guangli Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 93-100.

0 引言

【研究意义】灌区是中国农业规模化生产的重要基地和农业、农村及国民经济发展的基础设施, 同时也是一个开放式生态系统。目前灌区水环境恶化、农业面源污染严重、生物多样性减少等一系列问题严重影响着灌区的持续发展^[1]。河流水质是流域地形、地貌等自然条件和人类生产、生活综合作用的结果^[2]。水体富营养化是河流污染的一个典型问题^[3], 已经严重影响到水资源的可持续利用和经济社会的可持续发展^[4]。氮、磷是影响水体富营养化的主要因

素, 氮、磷等营养物质进入湖泊、河口等水体中, 导致水体中的藻类大量繁殖, 使得水体的富营养化程度日益严重^[5]。因此, 对灌区水质及氮磷污染状况进行研究对进一步促进生态灌区建设具有重要意义。

【研究进展】在中国污染物排放中, 农业生产排放的污染物成了重要排放源, 超过了工业和生活污染, 其中氮磷污染占50%以上^[6]。农业面源污染已成为当前形势下最严重的面源污染^[7-9]。灌区内大量废水的排放, 导致灌溉回归水中的氮、磷等普遍超标, 已成为灌区河道的主要污染来源^[10]; 宁夏引黄灌区排水沟水环境的研究表明, 农业面源污染及工业废水是影响其水环境的主要原因^[11]。河套灌区秋浇导致沟道中总氮、氨态氮质量浓度明显增大, 对地表水及地下水环境都产生了很大的影响^[12], 控水控肥有利于控制农田面源污染^[13]。【切入点】而广利灌区流经城镇生活区、工业区和农业生产区, 面临着诸多污染和富营

收稿日期: 2020-05-19

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费所级统筹项目(FIRI2019-01-02)

作者简介: 谷少委(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事现代节水生态型灌区研究。E-mail: gshaowei1993@163.com

通信作者: 吕谋超(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: lvmouchao@aliyun.com

养化等问题,而且村镇级小河流数目众多且狭窄,大多是监测盲点。且灌区水环境的改善和河流污染综合治理在加强农村污染治理和生态环境保护,推动农业农村绿色发展等方面承担着重要的角色。因此,有必要对广利灌区总干渠水质及氮磷污染进行研究。

【拟解决的关键问题】本文从灌区尺度出发,研究灌区总干渠总氮(TN)、总磷(TP)、 COD_{Cr} 和 BOD_5 等的负荷特征及趋势,全面了解河流水环境及氮磷污染和富营养化状况,有助于准确掌握灌区的水环境状况,可为灌区总干渠的水环境治理,尤其是氮磷污染控制与治理提供基础和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

广利灌区位于河南省焦作市西南部,北纬 $34^{\circ}55' - 35^{\circ}11'$,东经 $112^{\circ}37' - 113^{\circ}13'$,属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 $14.2 \sim 14.8^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 585 mm ,多年平均蒸发量为 $1\ 668\text{ mm}$,无霜期 $216 \sim 240\text{ d}$ 。灌区是集灌溉、补源等功能为一体的井渠结合大型灌区,涉及济源市东北部、沁阳市沁南地区、温县以北、武陟沁南西部24个乡(镇、办事处)、441个行政村,人口50余万人;现有总干渠1条、干渠10条、支渠33条,设计自流灌溉面积 1.2 万 hm^2 ,以灌代补面积 0.87 万 hm^2 ,补源面积 1.33 余万 hm^2 ;作物种植模式以冬小麦-夏玉米轮作为主,并有少量水稻以及花生、油菜等经济作物。本研究选取灌区内最具有代表性的输水总干渠为研究对象,沿总干渠在乡镇下游排水沟渠交汇点、渠道转折点,分别在五龙口渠首、二号闸、水东站、三号闸、补源进水口和龙洞节制闸,设置6个取样点进行水质监测。于2019年6—12月期间每月采集1次样品,另外在降雨能形成有效径流的8月7日取样。采样时,每个取样点均匀设置3个断面、并于监测断面水下 0.5 m 处采集水样,装入采样瓶中低温保存,在 24 h 内送到实验室分析。

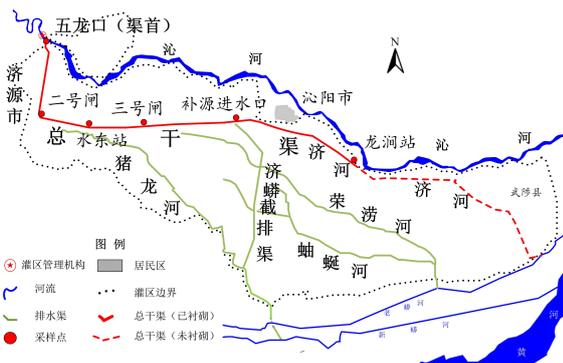


图1 广利灌区灌排系统示意

Fig.1 Schematic diagram of irrigation and drainage system in Guangli irrigation district

1.2 样品分析与数据处理方法

TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(HJ636—2012)测定;TP采用钼锑抗-分光光度法(GB11893—1989)测定;氨氮采用纳氏试剂-分光光度法(HJ535—2009)测定;化学需氧量(COD_{Cr})采用重铬酸盐法(HJ828—2017)测定;5d生化需氧量(BOD_5)使用培养箱采用稀释与接种法(HJ505—2009)测定。具体操作方法参照水和废水监测分析方法^[14]。所有数据采用Excel进行分析和图形制作。

1.3 河流综合水质标识指数计算方法

采用适用于我国河流水质综合评价的综合水质标识指数法来综合评价河流水质,并根据综合水质标识指数的各级分级标准(I类: $0 \leq X_1, X_2 \leq 2.0$; II类: $2.0 < X_1, X_2 \leq 3.0$; III类: $3.0 < X_1, X_2 \leq 4.0$; IV类: $4.0 < X_1, X_2 \leq 5.0$; V类: $5.0 < X_1, X_2 \leq 6.0$;劣V类但不黑臭: $6.0 < X_1, X_2 \leq 7.0$;劣V类并黑臭: $X_1, X_2 > 7.0$),对研究区河流的综合水质类别,水质情况与水环境功能区类别进行评价与划分。其计算式^[15]为:

$$I_{\text{wq}} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4, \quad (1)$$

其中: $X_1, X_2 = \frac{1}{m} \sum (P_1' + P_2' + \dots + P_m')$, (2) 式中: I_{wq} 为综合水质评价指数; X_1, X_2 由计算获得, X_3 和 X_4 根据比较结果获得;其中 X_1 为河流总体的综合水质类别, X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间内所处位置, X_3 为参与综合水质评价的水质指标中,劣于水环境功能区目标的单项指标个数, X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果、视综合水质的污染程度而定; m 为参加综合水质评价的水质单项指标的数目; P_1', P_2', P_m' 分别为第1、第2、第 m 个水质因子的单因子水质指数,为对应单因子水质标识指数中的整数位和小数点后第1位,单因子水质标识指数的中的 X_1, X_2 计算方法见参考文献[16]。

1.4 河流富营养化指数计算方法

采用广泛适用于我国湖、库和地面河流水体的富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式,计算广利灌区区域内河流水体富营养化评价综合指数(EI);根据富营养化状态的各级分级标准(贫: $EI \leq 20$;中: $20 \leq EI \leq 39.42$;富: $39.42 \leq EI \leq 61.29$;重富: $61.29 \leq EI \leq 76.28$;极富: $76.28 \leq EI \leq 99.77$),评价灌区内河流各个取样点处水体的富营养化状态,其计算式^[17]为:

$$EI = \sum_{j=0}^n W_j \cdot EI_j = 10.77 \cdot \sum_{j=0}^n W_j \cdot (\text{Ln} Y_j)^{1.1826}, \quad (3)$$

式中: W_j 为指标 j 的归一化权重值,本次研究将各个指标作等权重处理; EI_j 为指标 j 的富营养化评价普适指数; Y_j 为由“规范表示式”计算得到的指标 j 的“规

范值”，由于不同评价指标的单位、量纲并不完全相同，致使不同指标的同级标准值差异很大，有的甚至相差几个数量级。本文中对各个指标分别设定一个适

当的“参照值” C_j ，对不同指标，构造相对于指标“参照值” C_j 的不同“规范变换式”，最后可计算出各指标的“规范值” Y_j ，具体计算方法见参考文献[17]。

表 1 2019 年广利灌区沁阳站降水量

Table 1 Qinyang station in Guangli irrigation district in 2019

指标	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
降水量/mm	41.0	45.0	89.5	68.0	77.8	1.0	6.0	9.0	7.0	1.0	43.0	1.5

注 数据来源沁阳国家气象观测站。

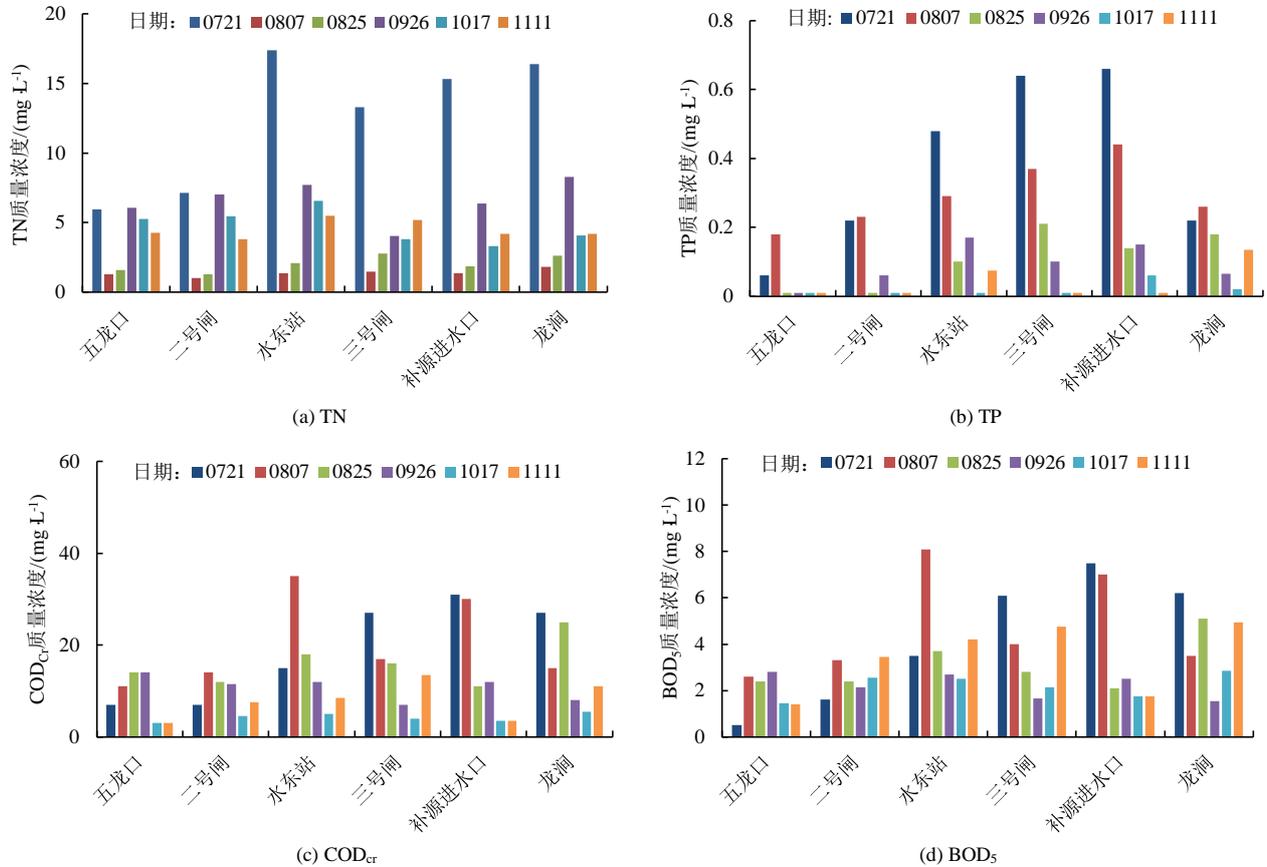


图 2 广利灌区总干渠主要污染物变化特征

Fig.2 Variation characteristics of main pollutants in main canal of Guangli irrigation district

2 结果与分析

2.1 广利灌区总干渠主要污染物的时空变化特征

广利灌区总氮 (TN)、总磷 (TP)、COD_{Cr} 和 BOD₅ 随时间和空间变化明显。广利灌区 6—11 月的引水量分别为 75.2 万、180.9 万、419.5 万、683.0 万、1 329.7 万和 757.1 万 m³，6、7 月广利灌区引水量较少，6 月河道基本处于断流状态（水流不连续，故未取样）。如图 2 所示，在 7 月枯水期，各个监测指标质量浓度都相对较高，TN 质量浓度为 5.95~17.40 mg/L，为 V 类水标准的 3~8.7 倍，都处于劣 V 类水标准；在 8 月，TN 质量浓度相对其他月份较低，大多为 IV 类水或 V 类水，最高在三号闸断面 (2.79 mg/L)，超出了 V 类水标准 39.5%；9 月 TN 质量浓度呈现出和 7 月相同的趋势，相对于 8 月增加了 3 倍以上；10、11 月情况类似，TN 质量浓度相对于 9 月有所降低。

总体上整个灌区内 TN 质量浓度都较高，平均质量浓度为 5.30 mg/L，为地表水 V 类水标准的 2.65 倍。TP 质量浓度在 7 月枯水期质量浓度较高，为 0.06~0.66 mg/L，最高为 V 类水标准的 1.65 倍。在 8 月上旬，水质相对于 7 月逐渐转好，但 TP 质量浓度大多还处在 IV 类水或 V 类水之间，在补源进水口处为劣 V 类水，从 8 月下旬开始，TP 质量浓度逐渐降低，最高在三号闸断面为 0.21 mg/L，为 V 类水标准的 52.5%，渠道水质大多处在 II 类水或 III 类水。进入冬季之后，TP 质量浓度处于较低水平，但在城市下游龙涧节制闸断面 TP 质量浓度相对较高。灌区内总干渠内的 TP 质量浓度除夏季枯水期之外都相对较低，灌区内氮、磷比为 33.97 : 1，利于藻类的生长与繁殖。总干渠水体 COD_{Cr} 及 BOD₅ 质量浓度较低，能满足农业功能区用水要求，在监测期内，91% 的水体都在 V 类水标准以下，污染程度较轻，COD_{Cr} 和 BOD₅ 呈现出的变

化趋势大致相同，7、8 月质量浓度相对较高，上游水质大多为Ⅲ类水，而在 9、10、11 月 COD_{Cr} 和 BOD_5 质量浓度逐渐回落，水质相对较好，大多为Ⅲ类水。沿总干渠走向，从上游到下游，TN 质量浓度总体上逐渐升高，最高在水电站断面达到了 17.4 mg/L。但从水电站断面到三号闸断面，河道为无衬砌土质渠道，TN 质量浓度呈降低趋势，相比水电站下降了 23.6%。从三号闸断面到龙涧节制闸断面，TN 质量浓度又呈逐渐升高的趋势。TP 质量浓度沿总干渠走向直至补源进水口，质量浓度逐渐升高，且在水电站大幅度升高，在水电站到补源进水口，都处于 V 类水标准及以下。之后在龙涧节制闸断面质量浓度显著降低。随着河流经过城镇， COD_{Cr} 和 BOD_5 质量浓度逐渐升高，最高在水电站，达到了 8.10 mg/L 和 35.00 mg/L，水质仅为Ⅳ类水或 V 类水标准。

2.2 广利灌区河流水质综合变化特征

采用广泛适用于我国河流水质综合评价的综合水质标识指数法来评价各取样点不同时期的水质。由图 3 可知，在 7 月，随着水流从渠首进入灌区，水质逐渐恶化，在水电站已经超出了 V 类水标准，属于劣 V 类水但不黑臭，但在三号闸和补源进水口已经属于劣 V 类并产生了黑臭水体，远远超出了功能区所要求的水质。随着水流经过无衬砌的土渠，水质在龙涧节制闸有所转好，但也超出了功能区所要求的标准。在 8 月整个灌区内的水质相对较好，灌区总干渠内水质大多不超过Ⅳ类水标准，仅在 8 月上旬的补源进水口为 V 类水。9 月水质相对于 8 月下旬变差，但 9 月整个灌区内水质较好且稳定，在三号闸水质为Ⅲ类，其余监测点水质都为Ⅳ类。10 月总干渠内水质较好，都为Ⅲ类水。11 月总干渠内在三号闸和补源进水口为Ⅳ类水，其余监测点都为Ⅲ类水。

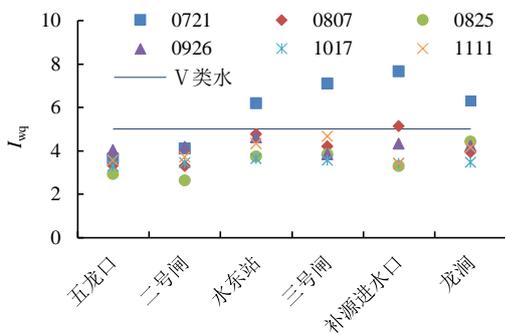


图 3 广利灌区综合水质标识指数

Fig.3 Comprehensive water quality identification index of Guangli irrigation district

综上所述，灌区内除 7 月外，在下半年水质都能满足农业用水和一般景观要求用水的水质要求，但在 7 月，整个灌区内 66.7% 的区域都超出了此类标准，有些

地方还出现了黑臭水体。灌区总干渠内水质从渠首进入灌区内基本上都呈现出水质变差的规律，但在水电站到三号闸这 2 个监测点，在 50% 监测时间，水质呈现出变好的趋势。在其他时间水质增加幅度也较小，从补源进水口到龙涧节制闸，渠道经过长距离无衬砌土渠，水质相对于补源进水口处呈变好的趋势。

2.3 广利灌区河流水质富营养化变化特征

广利灌区总干渠水体富营养化评价综合指数结果如图 4 所示。

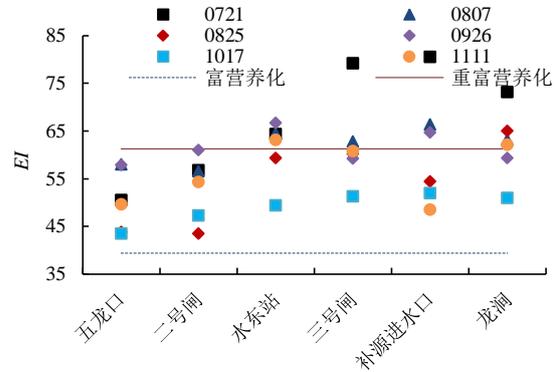


图 4 广利灌区富营养化评价综合指数

Fig.4 Comprehensive index of evaluation status of eutrophication in Guangli irrigation district

灌区内河流富营养化水平较高，水体 100% 处于富营养状态，且 41.6% 的水体处于重富营养化状态。EI 最低值出现在 10 月 (51.4)，EI 最高值出现在 7 月 (69.1)。富营养化水平在 7 月远远高于其他月份，属于重富营养化水平，其中在 7 月补源进水口 EI 值达到最高值 (80.5)，属于极富营养化状态；伴随着雨季的降雨，富营养化水平在 8 月呈下降趋势；但在 9 月富营养化水平又有所升高，处于重富营养化水平的边缘；10 月灌区引水量加大而使富营养化水平处于下半年历史最低点；11 月富营养化水平又有所升高。就空间分布而言，所有水体都处于富营养化状态。水体从渠首进入灌区之后，伴随着水体经过城镇和农业工业区，水体富营养化程度逐渐升高，但在水电站至三号闸这段除 7 月和 10 月之外，富营养化程度都有所降低，这与水质综合评价结果一致。水体在补源进水口进行了分流，大部分水体进入补源区，另一部分水体随总干渠往下游到达龙涧节制闸，在龙涧节制闸水体富营养化程度相对于补源进水口有所下降，但仍处于富营养化或重富营养化水平。

3 讨论

3.1 总干渠水质及氮磷污染时间变化特征分析

灌区内水体水质在 7 月污染较为严重，综合水质标识指数最高值为 7.64，平均值为 5.81，超出 V 类水标准 52.8%，属于劣 V 类水。EI 最高值出现在 7 月的补

源进水口(80.5), 处于极富营养化水平; 且TN、TP最大值也均出现在7月, 这主要是由于7月灌区引水量较小, 因此对农业面源污染和工业点源污染的稀释作用较小, 导致7月整体水质较差^[18]。有研究表明, 河流水体中的氮磷质量浓度随河流流量的增加而降低^[19], 但河流水体中的氮磷质量浓度并不是随着流量的增大而一直降低, 当流量达到一定值后, 其质量浓度会趋于稳定^[20]。TN质量浓度在8月降至较低水平。分析其原因, 主要是因为河流自净能力与降雨呈相关关系, 8月降雨较多, 雨水进入渠道对污染物进行了一定的稀释, 增强了河流自净能力, 致使水质变好^[21], 经过对水质和降雨线性回归分析, 广利灌区的水质与降雨之间的相关系数为0.32, 呈一定的相关关系。在雨季, 河流水体中的氮磷质量浓度有一定的降低, 而9—11月, 氮磷质量浓度显著增加, 分析原因, 可能是由于雨季藻类的大量繁殖吸收了一定的氮、磷等营养元素^[22], 但随着降雨减少, 气温降低, 存在藻类死亡的情况, 导致氮磷质量浓度增加^[23]。广利灌区内富营养化程度严重, 整个灌区内的所有监测断面都处于富营养化状态, 在8月, TP质量浓度和富营养化水平较高, 这主要是受降雨的影响, 降雨对地面产生冲刷, 使地面污染物和土壤中的氮磷随地表径流进入水体中^[24], 同时周围农业生产过程中的大量化肥和农药, 牲畜粪便等也径流到河流中^[25], 但由于磷在土壤中易形成难溶或不溶的磷酸盐, 随雨水进入水体后造成水体中磷质量浓度增高^[26], 这与刘峰等^[27]研究结果一致, 其认为河底沉积物承担着“汇”和“源”的作用, 河流中水体的扰动使其不断释放磷而使水体中磷质量浓度增加, 但随着降雨量的增大, 其增长幅度会逐渐变缓。对富营养化和降雨经过线性回归分析, 广利灌区的富营养化状况与降雨之间的相关系数为0.23, 呈一定的相关关系。广利灌区TP质量浓度在10月和11月相对于9月有所减少, 且10月富营养化水平较低, 这主要是由于10月灌区引水量较大, 对氮磷及其他影响水质的因子进行了稀释, 使水体中TP质量浓度处于较低水平^[19], 进而使EI值下降^[28]。以往研究表明, 一定的生态流量可以满足河流生态系统的保护和修复需要, 并在一定程度上可保障敏感河段的生态系统健康^[29]。COD_{Cr}和BOD₅质量浓度变化趋势一致且随时间变化显著, COD_{Cr}和BOD₅质量浓度在7—9月质量浓度较高, 根据调查与查阅资料, COD_{Cr}主要污染源为畜禽养殖和农业种植, BOD₅受到农业种植、工业废水与生活污水影响^[30], 在7—9月伴随着降雨, 农业面源污染进入渠道和工业生活污水的排放导致这段时间内的COD_{Cr}和BOD₅质量浓度较高。进入10月, 广利灌区引水量达到了1 329.7万m³, 分别为7、8、9

月的7.35、3.17、1.95倍, 对COD_{Cr}和BOD₅质量浓度进行了一定的稀释, 使COD_{Cr}和BOD₅质量浓度在10月降低的一个主要原因。11月灌区引水量减少, 导致11月的COD_{Cr}和BOD₅质量浓度又有所升高。

3.2 总干渠水质及氮磷污染空间变化特征分析

广利灌区流经城市生活区、村镇工业区和农业区, 污染来源较为复杂, TN、TP、COD_{Cr}及BOD₅质量浓度空间变化大。灌区总干渠水质、富营养化情况、TN、TP质量浓度等从渠首进入灌区内都呈逐渐升高的趋势。分析其原因, 主要是因为广利灌区总干渠流经城镇生活区, 区域内生活污水、工业废水的汇集以致渠道内的TN、TP质量浓度升高, 且区域内的人类活动也会引发了较多的河流生态问题^[31-32]。有研究表明, 水质与土地利用类型关系密切^[33-35], 渠首断面的TN、TP质量浓度较低, 这主要是由于其位于五龙口沁河出山口, 山区主要以林地为主, 林地利于减少水土流失和水质的污染^[36]。水东断面水质综合指数及TN质量浓度平均值最高, 富营养化水平较高, 分析原因, 一方面是由于此处位于城镇, 水体中氮磷污染物受生活污水、工业废水等排放的影响较大^[37], 且城镇排水系统较差, 生活污水直接进入河道, 加剧了污染程度^[38]; 另一方面由于城镇污染物的排放对水生植物产生了毒害, 不利于氮磷的降解, 人类活动加剧了河道的富营养化水平^[39]。三号闸断面位于水东下游, 但其水质综合指数、富营养化水平及TN质量浓度都有所减少。分析原因, 主要是由于从水东至三号闸是一段长达8 km的无衬砌土质渠道, 两岸与护坡上生长着许多水生植物。以往研究表明, 渠道衬砌不仅减少了浅层地下水补给, 而且影响河道护坡上草本植物的生长, 影响渠道周边的生态环境^[40], 不利于水体的自我净化, 面源污染很容易通过衬砌护坡进入水体加剧水体的污染负荷^[41]。从生态角度来说, 土质渠道是多种草、水生生物、昆虫等繁衍栖息的场所^[1], 且水生植物对于水体中的氮磷有很好的吸收作用, 对农业面源污染有很好的拦截效果^[42]; 其自我净化能力相对较好。随着水体流过村庄、乡镇和城市, COD_{Cr}和BOD₅质量浓度逐渐升高, 但从水东到三号闸, 同样出现了质量浓度降低的情况, 这与TN所呈现的规律一致, 这表明土质渠道同样对COD_{Cr}和BOD₅有一定的净化能力。

4 结论

1) 广利灌区总干渠水体中COD_{Cr}和BOD₅质量浓度较低, 在监测期内, 91%的水体都在V类水标准以下, 污染程度较轻。

2) 广利灌区总干渠水体中主要污染物(TN、TP)

时空分布特征明显,平水期氮磷污染严重,丰水期氮磷污染严重。TN平均质量浓度为5.30 mg/L,为地表水V类水标准的2.65倍,氮、磷比为33.97:1,利于藻类的生长;氮污染是影响广利灌区水质的最主要因素,需重点加强水体氮污染的监测与削减。

3)广利灌区总体水质尚能满足农业功能区用水要求,但富营养化水平较高,水体100%处于富营养化状态,且41.6%的水体处于重富营养化状态。因此,加大氮磷污染物在不同环节的最优滞留时间与净化效果的研究;同时构建田间节水灌溉、沟系控制排水和河道吸收净化的系统模式,以改变灌区氮磷污染现状。

4)广利灌区水质和富营养化状况在原生态土渠和水生植物生长区有明显改善趋势,渠道衬砌要考虑生态环境,配比生态衬砌和原生态土渠;河道搭配水生植物,进而对河水中的氮磷等污染物进行吸附,以改善灌区水环境。

参考文献:

- [1] 彭世彰,纪仁婧,杨士红,等.节水型生态灌区建设与展望[J].水利水电科技进展,2014,34(1):1-7.
PENG Shizhang, JI Renjing, YANG Shihong, et al. Construction and prospect of water-saving ecological irrigation district[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 1-7.
- [2] YING O Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. Water Research, 2005, 39(12): 2 621-2 635.
- [3] MOORE J W, SCHINDLER D E, SCHEUERRELL M D, et al. Lake eutrophication at the urban fringe, Seattle region, USA[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2003, 32(1): 13-18.
- [4] 单保庆,菅宇翔,唐文忠,等.北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价[J].环境科学,2012,33(2):352-358.
SHAN Baoqing, JIAN Yuxiang, TANG Wenzhong, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of north canal river watershed[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(2): 352-358.
- [5] 尚佰晓,王莉,王爽,等.铁岭莲花湖水体富营养化评价[J].湿地科学,2014,12(1):97-101.
SHANG Baixiao, WANG Li, WANG Shuang, et al. Eutrophication evaluation on waters in lianhua lake wetland in Tieling County[J]. Wetland Science, 2014, 12(1): 97-101.
- [6] 杨林章,冯彦房,施卫明,等.我国农业面源污染治理技术研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(1):96-101.
YANG Linzhang, FENG Yanfang, SHI Weiming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96-101.
- [7] 牟军,崔远来,赵树君,等.塘堰湿地对农田排水氮磷净化效果的影响研究[J].灌溉排水学报,2015,34(8):27-31.

- MOU Jun, CUI Yuanlai, ZHAO Shujun, et al. Effects of pond wetland on removing TN & TP from farmland drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8): 27-31.
- [8] WANG H L, WU Z N, HU C H. A comprehensive study of the effect of input data on hydrology and non-point source pollution modeling[J]. Water Resources Management, 2015, 29(5): 1 505-1 521.
- [9] ALVAREZ S, ASCI S, VOROTNIKOVA E. Valuing the potential benefits of water quality improvements in watersheds affected by non-point source pollution[J]. Water, 2016, 8(4): 112.
- [10] 杨培岭,李云开,曾向辉,等.生态灌区建设的理论基础及其支撑技术体系研究[J].中国水利,2009(14):32-35,52.
YANG Peiling, LI Yunkai, ZENG Xianghui, et al. Ecological irrigation district: Studies on theory basis and supporting technical system[J]. China Water Resources, 2009(14): 32-35, 52.
- [11] 郑灿,杨子超,邱小琮,等.宁夏引黄灌区排水沟水环境质量及其影响因素[J].水土保持通报,2018,38(6):74-79,87.
ZHENG Can, YANG Zichao, QIU Xiacong, et al. Water environmental quality of drainage ditches and their controls in ningxia irrigation area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 74-79, 87.
- [12] 李凤军,杨树青,史海滨,等.河套灌区秋浇期氮素流失对水环境的影响[J].中国农村水利水电,2012(6):40-42,46.
LI Fengjun, YANG Shuqing, SHI Haibin, et al. The influence of Hetao irrigation district autumn poured period nitrogen element loss on water environment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(6): 40-42, 46.
- [13] 马建琴,郭薇,刘蕾.水肥耦合模式下沙颖河农业非点源污染模拟研究[J].灌溉排水学报,2020,39(7):111-119.
MA Jianqin, GUO Wei, LIU Lei. Study on simulation of agricultural non-point source pollution in Shaying river under water-fertilizer coupling model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 111-119.
- [14] 复盛,国家环境保护总局.水和废水监测分析方法编委会.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.
- [15] 徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-488.
XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4): 482-488.
- [16] 徐祖信.我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):321-325.
XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3): 321-325.
- [17] 李祚泳,汪嘉杨,郭淳.富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式[J].环境科学学报,2010,30(3):664-672.
LI Zuoyong, WANG Jiayang, GUO Chun. A universal index formula for eutrophic evaluation using a logarithmic power function[J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(3): 664-672.
- [18] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4 194-4 204.
WANG Yu, LU Shiguo, FENG Qi, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in the upper and middle reaches of Heihe River[J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4 194-4 204.
- [19] 卓泉龙, 林罗敏, 王进, 等. 广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3 100-3 109.
ZHUO Quanlong, LIN Luomin, WANG Jin, et al. Seasonal and spatial variation of nitrogen and phosphorus concentrations in Liuxi River in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(10): 3 100-3 109.
- [20] KALKHOFF S J, HUBBARD L E, TOMER M D, et al. Effect of variable annual precipitation and nutrient input on nitrogen and phosphorus transport from two Midwestern agricultural watersheds[J]. Science of the Total Environment, 2016, 559: 53-62.
- [21] AL BAKRI D, RAHMAN S, BOWLING L. Sources and management of urban stormwater pollution in rural catchments, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2008, 356(3/4): 299-311.
- [22] SMITH D R, WARNEMUENDE E A, HAGGARD B E, et al. Changes in sediment-water column phosphorus interactions following sediment disturbance[J]. Ecological Engineering, 2006, 27(1): 71-78.
- [23] CORRELL D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 261-266.
- [24] 李延, 毕见霖, 王立硕, 等. 暴雨径流对非常规水源补给城市河流水质冲击研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 443-448.
LI Yan, BI Jianlin, WANG Lishuo, et al. Effect of storm runoff on the water quality of urban rivers with unconventional water sources[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 443-448.
- [25] 朱科, 李为萍, 史海滨, 等. 沈乌灌域天然湖泊非冰封期水质阶段性评价与分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 114-120.
ZHU Ke, LI Weiping, SHI Haibin, et al. Evaluating and analyzing the water quality of natural lakes in Shenwu irrigation district during non-frozen period[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 114-120.
- [26] 顾振锋, 王沛芳, 陈娟, 等. 望虞河西岸河流氮磷污染状况及其对调水水质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1 428-1 435.
GU Zhenfeng, WANG Peifang, CHEN Juan, et al. Nitrogen and phosphorus pollution in the west bank of Wangyu river and its impact on water quality of water diversion[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(11): 1 428-1 435.
- [27] 刘峰, 高云芳, 王立欣, 等. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4): 137-144.
LIU Feng, GAO Yunfang, WANG Lixin, et al. Review on nitrogen and phosphorus forms and distribution in sediments[J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(4): 137-144.
- [28] 金鑫, 单保庆, 李思敏, 等. 北方典型干旱缺水型河流氮磷时空分布特征与富营养化评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3 538-3 544.
JIN Xin, SHAN Baoqing, LI Simin, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in typical arid river in Northern China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3 538-3 544.
- [29] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法: 以三峡水库及其坝下河段为例[J]. 中国科学(技术科学), 2013, 43(6): 715-726.
WANG Junna, DONG Zheren, LIAO Wengen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: A case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(6): 715-726.
- [30] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1 937-1 947.
XU Jing, WANG Yonggui, CHEN Yan, et al. Characteristics on spatiotemporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang river in upper reaches of Yangtze River basin[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1 937-1 947.
- [31] SHEN Z Y, HOU X S, LI W, et al. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China[J]. Ecological Indicators, 2015, 48: 417-427.
- [32] SUN R H, CHEN L D, CHEN W L, et al. Effect of land-use patterns on total nitrogen concentration in the upstream regions of the Haihe River Basin, China[J]. Environmental Management, 2013, 51(1): 45-58.
- [33] ZHOU P, HUANG J L, PONTIUS R G Jr, et al. New insight into the correlations between land use and water quality in a coastal watershed of China: Does point source pollution weaken it[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 591-600.
- [34] BU H M, MENG W, ZHANG Y, et al. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 41: 187-197.
- [35] 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.
- [36] LOPEZ R D, NASH M S, HEGGEM D T, et al. Watershed vulnerability predictions for the Ozarks using landscape models[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(5): 1 769-1 780.
- [37] 毕见霖, 王立硕, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1 703-1 709.
BI Jianlin, WANG Lishuo, WANG Xinhui, et al. Temporal and spatial variations of eutrophication and its risks in the urban rivers with unconventional water sources[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1 703-1 709.

- [38] 庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 等. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2 446-2 452.
QING Xuyao, REN Yufen, LYU Zhiqiang, et al. Characteristics of total nitrogen and total phosphorus pollution and eutrophication assessment of secondary river in urban Chongqing[J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2 446-2 452
- [39] 雷沛, 张洪, 单保庆. 丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3 038-3 045.
LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Baoqing. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33(9): 3 038-3 045.
- [40] 杜军, 杨培岭, 任树梅, 等. 河套灌区干渠衬砌对地下水及生态环境的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 144-150.
DU Jun, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of canal-lining project on groundwater and ecological environment in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 144-150.
- [41] 王超, 王沛芳, 侯俊, 等. 生态节水型灌区建设的主要内容与关键技术[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 1-7.
WANG Chao, WANG Peifang, HOU Jun, et al. Main contents and key technologies of constructing ecological water-saving irrigation district[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 1-7.
- [42] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84-88.
XU Hongdeng, XI Beidou, WANG Jinggang, et al. Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agriculture drainage ditch[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(2): 84-88.

A Preliminary Analysis of Water Quality and Nitrogen and Phosphorus Pollution in the Main Canal of Guangli Irrigation District

GU Shaowei^{1,2}, LIU Jieyun¹, FAN Xichao¹, QIN Jingtao¹, ZHONG Zhibo^{1,2}, LYU Mouchao^{1*}, GAO Jianmin³

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Tongyu River North Water Transmission Project Management Office, Lianyungang 222000, China)

Abstract: **【Objective】** One challenge facing developing sustainable irrigation districts is to alleviate water deterioration. This paper is to present the results of a preliminary study on water quality and nitrogen and phosphorus contents in the main canal of Guangli irrigation district in Henan province, and propose strategy to prevent water from deterioration. **【Method】** We selected six sections along the canal from June to December 2019, and measured monthly changes in total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), COD_{Cr} and BOD₅. We then evaluated water quality and eutrophication in the canal using the comprehensive water quality identification index - suitable for comprehensive evaluation of river water quality in China – and the exponential universal formula of power function in logarithmic form. **【Result】**①The comprehensive water quality identification index showed that 86% of the water in the irrigation district meets the Grade V standard for agricultural water usage. It was also found that the comprehensive water quality index varied spatiotemporally at significant level. In July, 66.7% of water in the canal deteriorated below Grade 5 standard, with black and odorous water (eutrophication) found at Gate 3 and the entry point to the canal. ②Eutrophication was widespread. The maximum eutrophication evaluation index was 80.5 and appeared in July at the entry point to the canal; approximately 41.6% of water in the district was seriously eutrophic. ③The average mass concentration of TN was 5.30 mg/L, 2.65 times the Grade V standard for surface water. The average mass concentration of TP was 0.156 mg/L and the ratio of total nitrogen to total phosphorus was 33.97 : 1, an ideal environment for algae bloom. **【Conclusion】** Overall, the water quality in the irrigation district meets the requirements for irrigation, but it is highly eutrophic with high nitrogen content. The original earth canals with aquatic plants are able to purify the water and keep the district ecologically function. Keeping water from deterioration therefore should tighten control of pollutants from entering the irrigation district, and monitor the changes in nitrogen and phosphorus. Channel lining should consider its consequence for ecological functions. Alternating lining and earth canal bed, combining with aquatic plants to take up the pollutants such as nitrogen and phosphorus, can improve water quality in the irrigation district.

Key words: Guangli irrigation district; main canal; water quality; nitrogen and phosphorus pollution; eutrophication

责任编辑: 白芳芳