

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.018

基于氮同位素的通扬运河污染负荷解析

钱睿智¹, 陈 静², 王永东¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225000; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要:根据污染物汇集方式的不同和通扬运河与支流的交汇点位置, 确定 37 个监测点位和 5 个河流特征断面, 分别在非雨期和雨期共监测采样 4 次; 通过分析样品中 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值来示踪硝酸盐的来源, 从而区分出各河道特征断面城市生活污水和工业污水、城市非点源污染、农业非点源污染、生活污水 4 个端元的占比; 依据得出的污染源分布规律, 设计了 3 种污染负荷削减方案, 相对于本底值对污染物浓度均有较大的削减作用, 其中, 引水方案的污染物削减量最大, 非点源削减方案对硝酸盐氮的抑制效果更加明显, 点源削减方案对氨氮、总磷的影响更为显著。

关键词: 同位素; 污染负荷; 硝酸盐; 削减方案; 通扬运河

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)04-0121-06

Analysis of pollution load of Tongyang Canal based on nitrogen isotope // QIAN Ruizhi¹, CHEN Jing², WANG Yongdong¹ (1. Yangzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Yangzhou 225000, China; 2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the different ways of pollutant collection and the intersection of Tongyang Canal and tributaries, 37 monitoring points and 5 river characteristic sections were determined, and monitoring samples were taken for 4 times in non rainy period and rainy period respectively. By analyzing the $\delta^{15}\text{N}$ value and $\delta^{18}\text{O}$ value can be used to trace the source of nitrate, so as to distinguish the proportion of urban domestic sewage and industrial sewage, urban non-point source pollution, agricultural non-point source pollution and domestic sewage in the characteristic sections of rivers. According to the distribution law of pollution sources, three kinds of pollution load reduction schemes are designed, which have a greater reduction effect on the pollutant concentration compared with the background value. Among them, the pollutant reduction of water diversion scheme is the largest, the inhibition effect of non-point source reduction scheme on nitrate nitrogen is more obvious, and the effect of point source reduction scheme on ammonia nitrogen and total phosphorus is more significant.

Key words: isotope; pollution load; nitrate; reduction plan; Tongyang Canal

淡水水体中硝酸盐的氧同位素组成作为额外的识别手段, 已经广泛地应用于识别淡水系统的硝酸盐污染的研究中^[1-2]。早在 20 世纪 80 年代, 硝酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 就已经得到了深入的研究, 只是限于当时的技术水平不能被广泛应用^[3]。研究表明, 大气沉降中的硝酸盐与土壤微生物产生的硝态氮的 $\delta^{18}\text{O}$ 之间有一定的差异^[2-4], $\delta^{18}\text{O}$ 也是其他硝酸盐来源 (如合成硝酸磷肥) 的良好指标^[2], 联合硝酸盐中 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的方法能为示踪氮污染源和了解氮循环过程提供更有价值和更加准确的线索, 两种同位素有互补作用。而在合成肥料和土壤有机氮同时存在的条件下, $\delta^{15}\text{N}$ 会有重叠, 只能采 $\delta^{18}\text{O}$ 区分不同的来源。结合使用硝酸盐中 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值能

够更有效和准确地示踪硝酸盐来源和绘制循环过程。水环境研究表明, 生态系统中存在多种潜在的硝酸盐来源。不同来源的硝酸盐的同位素组成, 可应用同位素技术对硝酸盐来源贡献进行量化^[2,4]。

通扬运河位于南水北调东线水源区, 流经区域都是人类活动对自然环境影响强烈的地区, 人口集中、工农业活动密集。作为区域居民生活污水、工业废水和地表径流排放的主要载体, 通扬运河很容易遭受污染和破坏^[5]。从该区域受纳水体看, 实际进入水体的不同污染物来源及其相对贡献并不明确^[6-7], 河流水质的时空变化对不同特征污染源输入的响应机制也有待进一步研究。工业点源污染、城镇生活污染、农业与农村面源污染相互交织、相互

叠加,构成复合型污染^[8]。定量识别该区域水体污染源,揭示污染源排放对河道水质的影响机制^[9],对南水北调东线水源区水污染控制方案的制定和水环境安全保障有重要的意义^[10]。

1 研究区概况

本文以扬州通南片区为研究对象,重点考虑通扬运河,研究区域东部以白塔河为界、南部以灰粪港为界、西部以邵仙引河为界、北部以江海高速公路为界。研究区总面积 115.38 km²,下垫面分类见图 1,其中农业用地面积 59.39 km²,工业用地面积 14.78 km²,绿化用地 3.46 km²,低密度住宅用地(绿化与屋顶面积比大于 0.3)22.91 km²,高密度住宅用地(绿化与屋顶面积比小于或等于 0.3)14.84 km²。土地利用类型占比最大的是农业用地;居住用地主要集中在仙女镇主城区和宜陵镇,且高密度住宅在主城区占比最大,低密度住宅主要分布在农业用地中间;工业用地主要分布在主城区周围和宜陵镇西北;绿化用地和坑塘零星分布其中。

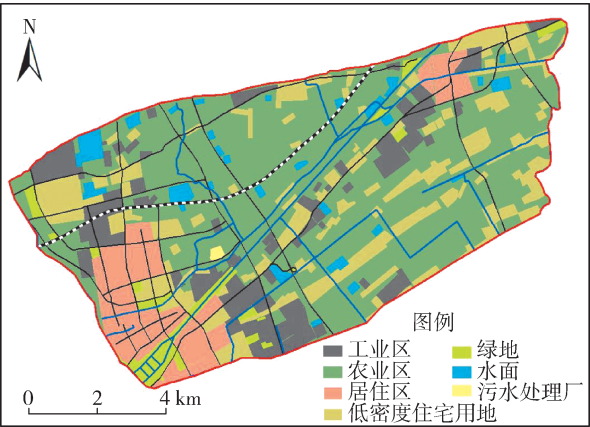


图 1 下垫面分类

Fig.1 Classification of underlying surface

根据《江苏省地表水(环境)功能区划》,通扬运河涉及 3 个省级水功能区,与其连通的河道涉及 4 个省级功能区,包括农业用水区、工业用水区、排污控制区和过渡区。通扬运河江都过渡区达标率为 16.7%,农业用水区、工业用水区总达标率为 13.3%;红旗河达标率较高,为 33.3%;通扬运河、小涵河和白塔河均不达标,超标项目为高锰酸盐指数、氨氮、化学需氧量和溶解氧;盐邵河和野田河两个江都农业用水区、工业用水区达标率分别为 50.0% 和 66.7%;通扬运河江都排污控制区达标率为 100%;江都区通扬运河以及相连的河道水质达标率过低,水质为Ⅳ~劣Ⅴ类^[11]。

2 监测和采样

根据污染物汇集方式的不同,将通扬运河污染

源主要划分为点源污染和非点源污染^[12],再依据下垫面划分结果和调查情况,细分为不同类型的污染源。监测布点和样品采集都依据污染源的分类情况进行,以研究通扬运河典型污染来源的特征和分布情况。

2.1 污染源采样点分布

在研究区域共设置 37 个监测点位,包括屋面径流(2 个)、路面径流(10 个)、草地径流(1 个)、农田径流(4 个)、河水(10 个)、工业废水(2 个)、生活污水(1 个)、地下水(2 个)和降水(5 个)等不同类型的采样点,分布如图 2 所示。其中,工业废水取自仙女桥和龙川二桥下的排污口;城市生活污水取自三元桥下的市政排污口;降水、城市屋面径流、城市路面径流、城市绿化径流、农村路面径流、农村屋面径流及农田径流水样分别取自 2016 年 9—10 月和 2017 年 8 月的 3 场降雨。以上样品分别作为主要污染端元的污染源代表样品。

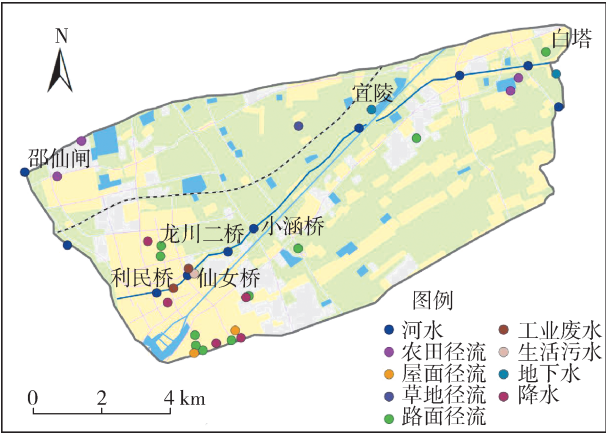


图 2 污染源采样点分布

Fig.2 Sampling distribution of pollution sources

2.2 河道控制断面分布

河流水质控制断面最主要的功能是反映河流水质的变化状况和污染程度,水质控制断面的数目可以根据城市排污口分布状况和工业布局进行设定^[13]。根据下垫面特征、工农业活动和本底水质情况,将通扬运河预先划分为 3 个部分:上游部分、中游部分和下游部分(图 3)。上游部分位于调水保护区,严格限制污染物的排入(U1,U2),水质长期处于Ⅱ、Ⅲ类;中游部分位于江都仙女镇城市区域(M1~M5),下游部分位于耕地和农村区域(D1~D4),中下游地区水质明显下降,为Ⅳ~劣Ⅴ类;平原河网地区水流方向会发生改变,于长期处于入流状态的两条支流处增加了采样点位(T1,T2,T3)。

由于模型计算需要足够的样本支持,根据支流汇入与样品采集情况,选取了 5 个样本数量足够的断面:邵仙闸、仙女桥、小涵桥、宜陵桥、白塔桥,其中

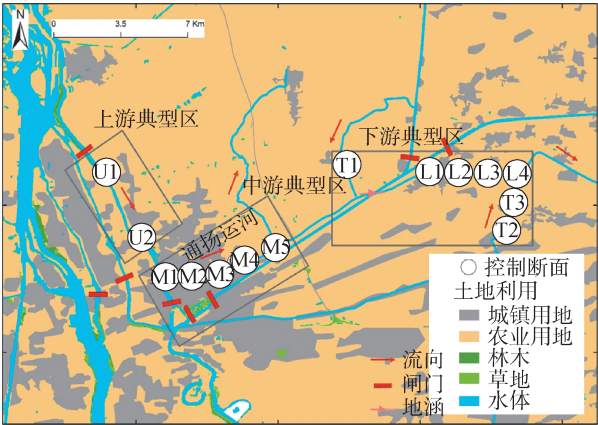


图3 河道控制断面分布

Fig.3 Distribution of river control sections

邵仙闸(U1)位于通扬运河源头,仙女桥(M3)位于江都城区,小涵桥(M5)位于小涵河汇入点,宜陵桥(L1)位于顾圩河汇入点西侧宜陵地涵处,白塔桥(L4)位于白塔河汇入点。

2.3 采样方法

参考 HJ 494—2009《水质采样技术指导》,采集河流控制断面水样、井水水样、点源及面源污染水样。具体采样时间为2016年9月12日、10月26日和2017年8月7—8日,共4次,其中非雨期1次,雨期3次(小雨1次,大雨2次),每次采样时间间隔1 h,具体情况见表1。

2.4 样品分析

利用反硝化细菌法测定硝酸盐氮、氧同位素值^[14]。选用缺乏 N₂O 还原酶活性的反硝化细菌将 NO⁻ 全部转化为 N₂O,使用 Trace Gas Preconcentrator-Isoprime 测定 N₂O 同位素组成^[15]。利用4个国际标准 USGS-32、USGS-34、USGS-35 和 IAEA-N3 进行数据校正,氮同位素值以样品相对于标准大气 N₂ 的¹⁵N 和¹⁴N 比值的千分偏差($\delta^{15}\text{N}$)表示,氧同位素值以样品相对于标准 VSMOW 的¹⁸O 与¹⁶O 比值的千分偏差($\delta^{18}\text{O}$)表示^[16]。

3 污染负荷解析

3.1 典型污染源样品特征分析

来源不同的硝酸盐具有不同的氮、氧同位素组成以及不同含氮物质的分馏机理,不同来源的硝酸盐氮同位素比率值一般在不同特定范围内波动^[17],

根据污染源样本的同位素检测结果,统计了不同污染源种类的氮、氧同位素值情况,见表2。

表2 不同污染源种类的同位素值

Table 2 Isotopic values of different pollution sources			
污染源种类	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样本数
生活污水	3.62	19.67	1
工业污水	3.026	22.47	2
城市路面径流	5.11 ± 1.78	36.15 ± 21.17	11
屋面径流	4.79 ± 1.06	24.36 ± 2.64	5
农田径流	5.33 ± 0.85	4.03 ± 5.96	5
农村路面径流	4.96	8.84	2
农业化肥	2.50	5.60	1
降水	0.70	57.24	5

由表2可见,不同种类污染源情况如下:①生活污水。本次生活污水采样于污水处理厂排水口,处理过的生活污水较未经过处理的污水中硝酸盐氮的浓度明显偏低,该部分样品个数太少,还需要进一步补充数据以完善端元值。②工业污水。企业加工过程中使用含氮的废水,由于其原材料与氮化学肥料相同,所以 $\delta^{15}\text{N}$ 值与化肥较接近。③城市路面径流。城市路面是城市中人类活动最频繁的下垫面,是城市地表径流污染产生的主要源区;城市雨水径流中的氮污染主要受交通流量、公路条件、汽车排放、街道餐饮业、行人卫生习惯等的影响,前期无雨日也会影响污染物累积情况,进而影响路面径流的污染程度^[18];城市雨水径流中的氮有多种形态,本身可能不含硝酸盐,需要通过硝化作用才能转化成硝酸盐,且氮污染来源复杂,影响因素众多,所以 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 有很大的变化范围。④屋面径流。建筑屋面在城市下垫面中占有相当大的比例,而且大都不透水。屋面污染物主要是干沉降和屋面材料的分解物质。屋面径流监测样本 NO₃⁻ 质量浓度均值为 0.985 mg/L,且呈现出明显的初期冲刷效应;屋面径流的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与路面径流的较为接近,说明屋面沉积物中的氮和路面沉积物的具有相同的来源,可将二者归为同一污染源端元。⑤农田径流。农田径流主要包含土壤微生物、农作物和化肥使用产生的氮,其 $\delta^{15}\text{N}$ 与化肥相近,但是 $\delta^{18}\text{O}$ 差异明显。⑥农村路面径流。农村路面径流的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与农田径流的较为接近,可将二者归为同一污染源端元。⑦农业化肥。现在使用广泛的农业化肥主要成分是

表1 降雨径流监测统计

Table 1 Rainfall runoff monitoring statistics

采样时间	总降水量/mm	开始时间	结束时间	降雨历时/h	监测点位
2016-09-12	0			0	7个河道断面、2个地下水、2个排水口
2016-10-26	41.5	6:35:00	12:30:00	5.9	33个河道断面、11个路面、5个屋面、5个降水、5个绿化区
2017-08-07	3.5	22:15:00	23:35:00	1.3	7个河道断面、2个路面、1个屋顶、1个降水
2017-08-08	36.5	5:40:00	12:10:00	6.5	19个河道断面、2个排水口、1个农田、4个路面、2个降水

尿素、铵盐和少量硝酸盐,根据实际调查采样发现,相对于农田径流污染,化肥中的 $\delta^{15}\text{N}$ 要低许多,这与氨的挥发作用和吸收作用有关;尿素和氮肥先水解为氨,再通过硝化作用氧化成硝酸盐,在氨挥发损失的过程中,剩余未挥发的氨将有着较高的同位素值;生物体吸收氮氮化合物的过程也会影响到氮同位素组成的变化。⑧降水。来源于大气沉降硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 很低, $\delta^{18}\text{O}$ 较大,经各类下垫面径流污染后硝化作用氧化成硝酸盐氮。

根据已有的不同污染源的同位素特征值,可以将同位素值相近的污染源样本合并,提取几类主要污染端元,从而简化污染源结构,为建立多端元质量平衡模型做准备。图4为典型污染源氮氧同位素分析结果。从图4可以看出,工业污水作为通扬运河氮污染的重要来源,可以作为一个重要端元;城市路面径流与屋面径流具有类似的同位素组成,可作为第二个端元,代表城市非点源污染;农田径流、农村路面径流和农业化肥有重叠的同位素值区间,可作为第三个端元,代表农业非点源污染;城市生活污水作为第四个端元,降水作为输入单元。

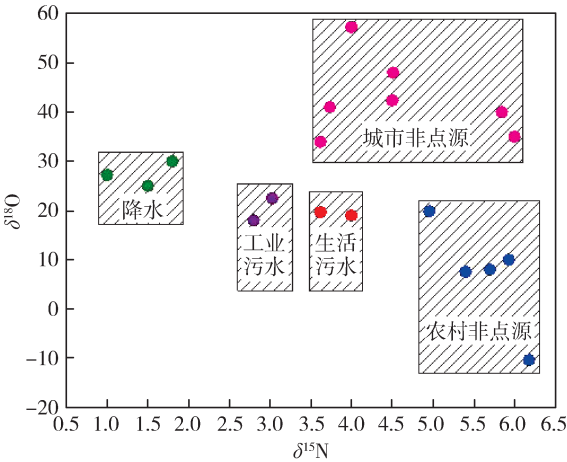


图4 典型污染源氮氧同位素分析结果
Fig.4 Analysis results of nitrogen and oxygen isotopes of typical pollution sources

3.2 河道控制断面水样特征分析

根据河道控制断面水质指标平均值(表3),可以看出,通扬运河江都段中部,仙女桥至宜陵段的氨氮、硝酸盐氮和硫酸盐的质量浓度明显偏高,意味着

污染源集中在河流中段,邵仙闸断面接近邵伯湖水源地,水体受污染程度小,白塔桥位于白塔河汇入点,白塔河的流量较大,有一定的稀释作用。

3.3 氮污染源来源比例计算

水样中硝酸盐的氮氧同位素值由不同端元同位素特征值乘以各自的贡献比 $f_i(i=1,2,3,4)$ 后再求和得到,各端元的贡献比之和为1。采用 IsoSource 软件进行稳定同位素混合模型的计算,该软件适用于源的数量太大不能确定唯一解决方案时,基于稳定同位素分析,计算混合物源比例贡献范围。IsoSource 软件基于混合同位素质量平衡方程,用户为混合物和每个源提供同位素特征以及源增量质量平衡公差。每种资源贡献范围(0~100%)的所有可能组合在小范围的增量(如1%)中都被进行检查分析,把各个组合中观测到的混合同位素信息相加,如果之和在一个较小的公差范围内(如 ± 0.01)那么这个组合就被认为是合适的解,从而可以确定潜在源贡献的频率和范围。IsoSource 将列出每个可行解决方案的输出文件,每个单独的解决方案都代表一个混合模型中满足同位素质量平衡的源比例的组合。软件最多可以使用5个同位素信息、10种来源。计算时,端元同位素值采用样本均值,输入增量为10%,质量平衡公差为0.05,计算结果见表4。通扬运河因为水力停留时间短,主要为外源氮输入。河流中硝酸盐的氧同位素值趋于相近,氮同位素值差异明显。仙女桥、宜陵桥的污染源组成比较复杂,点源、非点源都有很大的贡献。由表4可见,邵仙闸断面接近邵伯湖水源地,邵伯湖水直接通过邵仙闸补给下游,几乎没有点源排放,邵仙闸断面汇水范围内是邵伯镇,既有城镇用地也有农业用地,污染平均50%来源于城市非点源,40%来源于农业非点源。仙女桥断面位于江都城区内,约77%的氮污染来源于城市非点源,21%来源于农业非点源,符合土地利用特征,仙女桥断面靠近两个工业污染源排放点,但是点源污染的贡献率只有2%左右,可能是采样期间点源排放量较小导致。小涵桥断面位于江都城郊,河段承接农田降雨径流和城市降雨径流,城市非点源贡献率和农业非点源贡献率分别为48%和

表3 控制断面水质指标平均值

Table 3 Average values of water quality index of control sections

控制断面	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\rho(\text{NH}_3)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cl}^{-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^{-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	样本数
邵仙闸	4.83	22.16	0.04	0.15	27.09	24.71	1.56	8
仙女桥	3.48	24.88	2.43	0.24	11.50	27.89	1.76	9
小涵桥	6.54	26.42	2.96	0.23	24.05	28.97	2.00	8
宜陵桥	4.18	8.99	1.35	0.27	30.38	28.19	1.46	6
白塔桥	5.36	26.54	0.51	0.38	21.30	22.42	1.82	13

30%。宜陵桥、白塔桥断面位于通扬运河东段农业区内,汇水区内主要是农业用地,农业非点源的贡献率远大于城市非点源。宜陵桥断面上游有大量点源污染排放口,导致点源污染对宜陵桥处水体的贡献率较高。

表 4 各控制断面污染源贡献率均值
Table 4 Average contribution of pollution sources of each control section

控制断面	不同污染源贡献率均值/%			
	工业污水	生活污水	城市非点源	农村非点源
邵仙闸	7	3	50	40
仙女桥	2	0	77	21
小涵桥	10	12	48	30
宜陵桥	25	8	2	65
白塔桥	6	35	1	58

4 污染负荷削减方案

依据通扬运河水系连通和污染源分布情况,设计了 3 种污染负荷削减方案:

a. 引水方案。通过邵仙闸和邵仙引河,引入京杭大运河和邵伯湖清洁水源,增强水体流通性与自净能力,改善河道水环境质量。引水量设计为 40 m³/s,引水水质为Ⅱ类水,TP 质量浓度为 0.1 mg/L, COD 质量浓度为 4 mg/L,氨氮质量浓度为 0.5 mg/L, TN 质量浓度为 0.5 mg/L。

b. 非点源削减方案。通过关停污染严重的禽畜养殖场、农村生活污水治理、设置河岸缓冲带等非点源污染截污方案,减少非点源污染产生量与入河量,拟定削减量为 50%。

c. 点源削减方案。通过河道沿程点源污染控制工程,提高生活污水入网处理效率,关闭工业污水排污管道,初期雨水入网处理后再排放等措施,削减点源污染入河量,拟定削减量为 50%。

通过对 3 种污染负荷削减方案预期效果的模拟,发现相对于本底值 3 种削减方案对污染物均有较大的削减作用,其中引水方案由于引水量较大,污染物削减量也最大;与点源削减方案相比,非点源削减方案对硝酸盐氮的抑制效果更加明显,尤其是对于宜陵至白塔等农业面源影响显著的河段,控制农业面源入河量对降低硝酸盐氮浓度具有显著的作用;点源削减方案对氨氮、总磷的影响更为显著。总氮的分布情况比较复杂,在江都主城区,点源削减方案对总氮的作用较强,但是在宜陵镇附近的农业区,非点源削减措施的效果逐渐增强,部分河段总氮浓度低于点源削减方案。

5 结 论

a. 根据污染物汇集方式的不同和通扬运河与

支流的交汇点位置,确定 37 个监测点位和 5 个河流控制断面,分别在非雨期和雨期共监测采样 4 次;通过分析样品中 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值来示踪硝酸盐的来源,从而区分出各河道控制断面城市生活污水和工业污水、城市非点源污染、农业非点源污染、生活污水 4 个端元的占比。通扬运河上游区邵仙闸断面污染主要来源于城市非点源和农业非点源;中游区仙女桥断面污染主要来源于城市非点源;小涵桥断面污染主要来源于城市非点源和农业非点源;下游区宜陵桥断面污染主要来源于农业非点源和工业污水,白塔桥断面污染主要来源于农业非点源和生活污水。

b. 依据得出的污染源分布规律,设计了 3 种污染负荷削减方案,相对于本底值,对污染物均有较大的削减作用,其中,引水方案的污染物削减量最大,非点源削减方案对硝酸盐氮的抑制效果更加明显,点源削减方案对氨氮、总磷的影响更为显著。

参考文献:

[1] 郝卓. 亚热带典型流域大气氮湿沉降特征与环境效应及其同位素源解析[D]. 重庆:西南大学,2016.

[2] 陈自祥. 利用水体中溶解性硝酸根离子中的氮氧同位素组成来识别中国太湖和巢湖水体中氮污染源的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.

[3] 张俊萍,宋晓梅. 稳定同位素追踪水体中的氮来源的研究现状[J]. 环境科技,2014,27(6):71-75. (ZHANG Junping, SONG Xiaomei. Research advances on tracking multiply sources of nitrate by using stable isotopes in water [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 27(6):71-75. (in Chinese))

[4] 曹希. 氮、氧同位素识别太湖流域氮来源[D]. 合肥:安徽理工大学,2014.

[5] 王库,丁洪. 福州晋安河沿岸区域地表径流中氮磷污染物的空间分布特征及来源分析[J]. 福建地理,2012,7(3):20-25. (WANG Ku, DING Hong. Spatial distribution and source analysis of total nitrogen and phosphorus in urban runoff;a case from the area along Jinan River in Fuzhou[J]. Fujian Geography,2012,7(3):20-25. (in Chinese))

[6] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):74-79. (JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2019,35(2):74-79. (in Chinese))

[7] 周慧平,高燕,尹爱经. 水污染源解析技术与应用研究进展[J]. 环境保护科学,2014,40(6):19-24. (ZHOU Huiping, GAO Yan, YIN Aijing. Methods of source apportionment of water pollution and application progress [J]. Environmental Protection Science,2014,40(6):19-24. (in Chinese))

[8] 郑欣虹,陈建生. 苏北灌南地下水补给源同位素地球化学分析[J]. 水资源保护,2018,34(1):24-30. (ZHENG Xinhong, CHEN Jiansheng. Isotope geochemistry analysis

- of groundwater recharge source in Guannan, Northern Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):24-30. (in Chinese))
- [9] 韩龙喜,李伟. 多污染源随机排污的水质影响分析方法及其应用[J]. 水利学报, 2007, 38(8):986-990. (HAN Longxi, LI Wei. Method for assessing the impact of multiple randomly discharging pollutant sources on river water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8):986-990. (in Chinese))
- [10] 钱小娟. 长江下游南水北调东线源头区排污与长久水安全研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [11] 吴小伟,刘平,王永东. 南水北调东线工程江都段水环境现状及纳污削减方案探讨[J]. 治淮, 2016(12):87-89. (WU Xiaowei, LIU Ping, WANG Yongdong. Discussion on water environment status and pollution reduction scheme of Jiangdu section of the Eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Harnessing the Huaihe River, 2016(12):87-89. (in Chinese))
- [12] 蔡艳荣,丛俏,曲蛟. 环境影响评价[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2004.
- [13] 陈朝东. 水环境监测技术问答[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [14] 徐春英,李玉中,郝卫平,等. 反硝化细菌法结合痕量气体分析仪/同位素比质谱仪分析水体硝酸盐氮同位素组成[J]. 分析化学, 2012, 40(9):1360-1365. (XU Chunying, LI Yuzhong, HAO Weiping, et al. Analysis of nitrogen isotopic composition of nitrate in water by denitrifier method and trace-gas/isotope ratio mass spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2012, 40(9):1360-1365. (in Chinese))
- [15] 毛绪美,罗泽娇,刘存富,等. 细菌反硝化法同时分析天然水中硝酸盐氮、氧同位素组成研究[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5):97-100. (MAO Xumei, LUO Zejiao, LIU Cunfu, et al. Method of nitrogen and oxygen isotopic analysis of nitrate in water with bacterial denitrification at one time[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5):97-100. (in Chinese))
- [16] 钱会,马致远. 水文地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [17] 王静,郭熙盛,王青霄,等. 稳定氮同位素示踪技术在农业面源污染研究中的应用[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(4):2213-2215. (WANG Jing, GUO Xisheng, WANG Yunqing, et al. Application of stable nitrogen isotope trace technique in agriculture non-point source pollution[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, 40(4):2213-2215. (in Chinese))
- [18] 李慧. 粉煤灰介质渗滤系统对城市非点源污染物的处理效果与机理研究[D]. 合肥:安徽理工大学, 2016.

(收稿日期:2019-09-04 编辑:王 芳)

(上接第 120 页)

- [11] 李晓洁,饶竹,高冉,等. 丙酮对地下水中极性有机磷农药测定方法有效性的改进[J]. 水资源保护, 2015, 31(4):98-102. (LI Xiaojie, RAO Zhu, GAO Ran, et al. Improvement of method validity using acetone for determination of polar organophosphorus pesticides in groundwater[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4):98-102. (in Chinese))
- [12] 张列宇,饶本强,熊瑛,等. 人工湿地黑臭水体处理系统微生物脱氮机理研究[J]. 水生生物学报, 2010, 34(2):256-261. (ZHANG Lieyu, RAO Benqiang, XIONG Ying, et al. The microbial mechanism of horizontal constructed wetland used to treated black-odor river[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(2):256-261. (in Chinese))
- [13] 刘水芹,田华,胡岚. 太浦河调水对黄浦江上游水源地水质影响的试验[J]. 水资源保护, 2009, 25(4):40-43. (LIU Shuiqin, TIAN Hua, HU Lan. Experimental study on water diversion from Taipu River and its effect on water quality of drinking water sources of the Huangpu River upstream reach[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(4):40-43. (in Chinese))
- [14] 薛艺涵. 上海市水环境污染源调查及防治措施[J]. 山东工业技术, 2016(14):282. (XUE Yihan. Pollution source investigation and prevention measures of water environment in Shanghai[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(14):282. (in Chinese))
- [15] 李大鸣,栗琪程,卜世龙,等. 洋河水库流域非点源污染迁移特性及流域数学模型的构建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11):143-154. (LI Daming, SU Qicheng, BU Shilong, et al. Migration characteristics of non-point source pollution and construction of watershed mathematical model in the Yanghe Reservoir Basin[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2019, 47(11):143-154. (in Chinese))
- [16] 李泽岩,黄福杨,刘丹丹,等. 海河流域滹沱河冲洪积扇地下水中农药污染及分布特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2):186-194. (LI Zeyan, HUANG Fuyang, LIU Dandan, et al. Pollution and distribution characteristics of pesticides in groundwater in the alluvial-pluvial fan of the Hutuo river, Haihe River Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2):186-194. (in Chinese))
- [17] 宋宁慧,卜元卿,单正军. 农药对地表水污染状况研究概述[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(增刊1):49-57. (SONG Ninghui, BU Yuanqing, SHAN Zhengjun. A review of studies on pesticide pollution in surface water[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(Sup1):49-57. (in Chinese))
- [18] 国家环境保护总局. 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.
- [19] 庾从蓉,段佩怡. 植被过滤带的污染物去除效率研究进展[J]. 水资源保护, 2018, 34(2):68-74. (YU Congrong, DUAN Peiyi. Quantitative research advance on vegetative filter strips for non-point source pollution control[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):68-74. (in Chinese))

(收稿日期:2020-04-26 编辑:王 芳)