



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析

王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 尹儿琴, 孙甲玉

引用本文:

王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 等. 尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 26–35.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GWLF模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析

李泽利, 罗娜, 苏德岳, 高锴, 赵兴华, 梅鹏蔚, 张震

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 63–71 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0054>

利用整合分析方法探究我国不同土地利用类型区域河流硝酸盐的来源

张金兰, 蔺祖弘, 白文荣, 郇正来, 张婷婷, 林爱军, 肖勇

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 746–754 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0492>

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 814–821 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0210>

典型岩溶流域不同土地利用类型土壤腐植酸与钙的关系

吴丽芳, 倪大伟, 王妍, 刘云根, 王艳霞

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 259–267 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0217>

牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 286–294 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0270>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 等. 尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 26–35.

WANG L P, LOU S C, SUN X L, et al. Analysis of sources and characteristics of typical non-point pollution in a small watershed of Nishan reservoir, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 26–35.



开放科学 OSID

尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析

王立萍¹, 娄山崇¹, 孙秀玲², 尹儿琴^{3*}, 孙甲玉^{3*}

(1. 山东省水文局, 济南 250002; 2. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 3. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为了研究面源污染对尼山水库水环境的影响,在掌握水库和主要入库河流水质现状的基础上,取样分析了不同土地利用类型(玉米地、花生地、红薯地、核桃林地和村庄地面)面源污染的特点,并通过划定径流小区研究不同土地利用类型(村庄和玉米地)在降雨过程中污染物的流失规律。结果表明:2016—2019年的48个月中,尼山水库富营养化率高达89.58%,3条主要入库河流中,张马河和母庄河总氮(TN)超标严重;玉米地和花生地氮、磷污染严重,其中TN分别超Ⅴ类标准2.05倍和0.93倍,总磷(TP)分别超标1.38倍和3.08倍,红薯地和核桃林地污染相对较轻,村庄地面以有机物污染为主,其化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)和TP流失均呈先上升后下降的趋势,村庄的COD_{Cr}流失浓度为9.0~43.0 mg·L⁻¹,玉米地TN的流失浓度为1.38~3.40 mg·L⁻¹,TP的流失浓度为0.28~1.25 mg·L⁻¹,污染物最高浓度集中在降雨初期。研究表明,土地利用类型对面源污染影响较大,尼山水库小流域面源污染应重点关注小麦-玉米地的氮磷流失和初期雨水的防控。

关键词:尼山水库;面源污染;径流小区;污染特征;源头治理

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0026-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0067

Analysis of sources and characteristics of typical non-point pollution in a small watershed of Nishan reservoir, China

WANG Liping¹, LOU Shanchong¹, SUN Xiuling², YIN Erqin^{3*}, SUN Jiayu^{3*}

(1. Hydrological Bureau of Shandong Province, Jinan 250002, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: To study the influence of non-point source pollution on the water environment of Nishan reservoir, China, the pollution characteristics of different land use types (corn field, peanut field, sweet potato field, walnut forest, and village) were analyzed based on the water quality of Nishan reservoir and inflow rivers, and pollutant loss in different land use types (village and corn fields) was analyzed using delimiting runoff plots. The results showed that the eutrophication rate of Nishan reservoir was 89.58% during January 2016 to December 2019, and total nitrogen (TN) of Zhangma River and Muzhuang River greatly exceeded the V level of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). Nitrogen and phosphorus pollution in corn and peanut fields was high; in these fields, the TN exceeded the V standard by 2.05 and 0.93 times, and the total phosphorus (TP) exceeded by 1.38 and 3.08 times, respectively. The pollutant in the village was mainly organic matter, and chemical oxygen demand (COD_{Cr}) (32.0 mg·L⁻¹) was the highest. During rainfall, the loss of pollutants (COD_{Cr}, TN, NH₃-N, and TP) in the village and corn field runoff plots first showed an increasing and then a decreasing trend. The loss concentration of COD_{Cr} was 9.0~43.0 mg·L⁻¹ in the village. TN was 1.38~3.40 mg·L⁻¹ and TP was 0.28~1.25 mg·L⁻¹ in the corn field. The highest loss of pollutants occurred early during rainfall. Our results indicated that land use types have a great effect on non-point

收稿日期: 2021-02-01 录用日期: 2021-04-25

作者简介: 王立萍(1970—),女,山东济南人,高级工程师,主要从事水资源保护与利用研究。E-mail: 44418488@qq.com

*通信作者: 尹儿琴 E-mail: yinerqin@sdaa.edu.cn; 孙甲玉 E-mail: 1536929371@qq.com

基金项目: 山东省水文局资助项目(HYHA2019-0731, SDGP370000201902002236)

Project supported: Hydrological Bureau of Shandong Province(HYHA2019-0731, SDGP370000201902002236)

<http://www.aed.org.cn>

source pollution. The loss of nitrogen and phosphorus in wheat-corn field should be focused, and initial rainwater should be prevented and treated.

Keywords: Nishan reservoir; non-point source pollution; runoff plot; pollution characters; source management

水环境污染已成为当前我国最紧迫的环境问题之一,严重威胁人类生存环境和发展空间。近年来,水环境污染形势发生了很大变化,随着点源污染逐渐得到控制,面源污染对环境的影响逐渐显露出来,人们开始普遍认识到面源污染是导致水质恶化的主要原因^[1-2]。

尼山水库位于曲阜市尼山镇尼山旅游风景区内(刘楼村),泗河支流小沂河的上游,属淮河流域南四湖水系。尼山水库总库容1.128亿m³,兴利库容6 102万m³,是一座具有防洪、灌溉、用水、旅游等综合作用的大型水库,水质目标为Ⅲ类。主要入库河流有张马河、母庄河、夫子洞河,3条河流的平均流量分别为0.18、0.42、0.31 m³·s⁻¹。尼山水库流域(35°22′00″~35°34′12″N, 117°08′52″~117°21′49″E),面积258.57 km²。流域内多年平均降雨量750 mm,雨季多集中在7—9月,降雨量397 mm,占年均降水量的52.9%。流域内主要土地利用类型为耕地和林地,面积为145.93 km²和55.55 km²,分别占流域总面积的56.44%和21.48%;农村居民点和草地次之,面积为20.25 km²和21.51 km²,分别占7.83%和8.32%;水域和裸土地面积为11.82 km²和3.51 km²,分别占4.57%和1.36%。根据实地调查和资料分析,尼山水库流域内无典型工业污染,以农业种植为主,农业种植集约化和信息化程度较低,农药和化肥被大量使用,导致面源污染问题相对突出,亟待解决^[3-4]。

在相同环境条件下,土地利用方式是影响面源污染的主要因素^[5-7]。近年来,国内外学者利用人工模拟^[8-9]、径流小区实验^[10-11]、模型模拟^[12-13]等评价土地利用方式对面源污染的影响。这些研究中人工模拟相对较多,自然降雨条件下的实地观测相对较少。小流域是面源污染发生的源头,研究小流域污染物流失规律,从源头控制污染物流失,可有效遏制小流域面源污染向整个流域的蔓延和扩散^[14-15]。因此,本研究选取尼山水库小流域为研究对象,分析了尼山水库小流域内入库河流水质的时空变化特征,研究了不同土地利用方式对面源污染的影响以及不同土地利用方式在降雨过程中的污染物流失规律与流失特征,以期为

尼山水库及类似小流域面源污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

尼山水库库区水质数据来源于曲阜市尼山水库管理局,其他数据均为实测数据。

1.2 布点采样

分别在张马河、母庄河和夫子洞河3条河流入库口上游设置监测断面,具体位置见图1(1-1、1-2、1-3)。在丰水期(8月、9月)和枯水期(10月、11月)对3个断面进行样品采集,丰水期共采集样品12个,枯水期共采集样品10个。

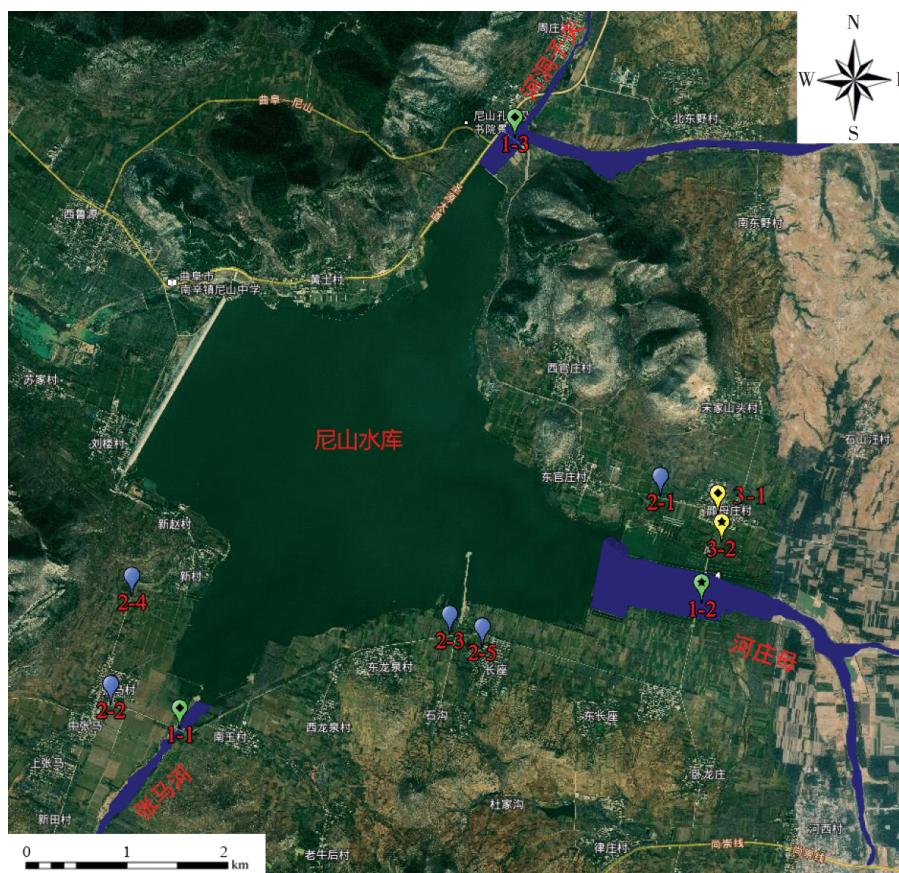
为研究不同土地利用类型对降雨产汇流携带的面源污染的影响,根据尼山水库流域内土地利用特点,分别对花生地、玉米地、红薯地、核桃林和村庄5种不同土地利用类型建立径流小区,在径流小区出口处利用坑塘收集同一场次5种不同土地利用类型的降雨汇流。本研究所选的5种径流小区土地利用类型单一,地形坡度基本一致,有自然闭合的集水区,5种径流小区具体位置见图1(2-1、2-2、2-3、2-4、2-5),基本情况见表1。

为研究降雨条件下面源污染物的流失规律及流失特征,选择耕地(玉米)和村庄(颜母庄)建立径流小区。在单场次降雨径流形成时开始采样,每隔5 min采样一次,降雨后期适当延长采样时间,在所选定的径流小区出口处采集表层水样,并利用标尺和三角堰测量水位和流量,此次降雨过程中每个点位共采集样

表1 径流小区基本情况

Table 1 The situation of runoff plots

序号 Number	土地利用类型 Land use type	面积 Area/hm ²	地理位置 Geographic position 经度 Longitude 纬度 Latitude	坡度 Slope
2-1	花生地	0.57	117.234 7° 35.476 1°	14.7°
2-2	玉米地	0.82	117.186 8° 35.460 6°	15.3°
2-3	红薯地	0.75	117.215 8° 35.465 9°	14.4°
2-4	核桃林	1.06	117.187 4° 35.468 7°	15.6°
2-5	村庄(西长座村)	2.71	117.219 8° 35.465 8°	16.3°
3-1	村庄(颜母庄)	3.58	117.240 1° 35.475 3°	14.6°
3-2	玉米地	1.15	117.240 6° 35.472 8°	15.7°



1-1:张马桥,1-2:颜母大桥,1-3:夫子洞大桥;2-1:花生地,2-2:玉米地,2-3:红薯地,2-4:核桃林,2-5:村庄(西长座村);
3-1:村庄(颜母庄),3-2:玉米地
1-1: Zhangma bridge, 1-2: Yanmu bridge, 1-3: Fuzidong bridge; 2-1: Peanut field, 2-2: Corn field, 2-3: Sweet potato field,
2-4: Walnut forest, 2-5: Village (Xichangzuo village); 3-1: Village (Yanmu village), 3-2: Corn field

图1 现场取样位置图

Figure 1 Distribution diagram of field sampling point

品27个。2种径流小区具体位置见图1(3-1、3-2),基本情况见表1。

1.3 样品检测和评价

采集的样品酸化后于24 h内测定化学需氧量(COD_{Cr})、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和总氮(TN)。 COD_{Cr} 采用重铬酸盐法测定;TP采用钼酸铵分光光度法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定^[16]。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)对水质进行分析和评价。

2 结果与分析

2.1 尼山水库水环境现状评价

根据山东省、济宁市和曲阜市水功能区划,尼山水库为饮用水源区,水质目标为Ⅲ类。按照《地表水环境质量标准》基本项目的21项(24项中除去水温、石油类和粪大肠菌群)和集中式生活饮用水水源地补

充项目5项对2016—2019年共48个月的水质进行分析,具体见图2。由图可知,尼山水库水质时有超标,多次出现劣Ⅴ类,其中 COD_{Cr} 在48个月中有2个月超标,TP也有2个月出现超标,TN有36个月出现超标,最大超标倍数高达4.13倍,其他指标未出现超标现象。按照《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395—2007)对尼山水库2016—2019年的营养状态进行了评价,评价指标包括TP、TN、叶绿素a、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和透明度,结果如图2d所示。由图2d可见4年间只有5个月为中营养,其他43个月均为轻度富营养化,富营养化率达到了89.58%,说明尼山水库已经具有发生水华的风险。

2.2 入库河流水质时空变化特征

为了全面掌握尼山水库流域内水环境现状及对尼山水库水质的影响,对入库河流水质的时空变化特征进行了分析。尼山水库入库河流有3条,分别为张马河、母庄河和夫子洞河(图1)。

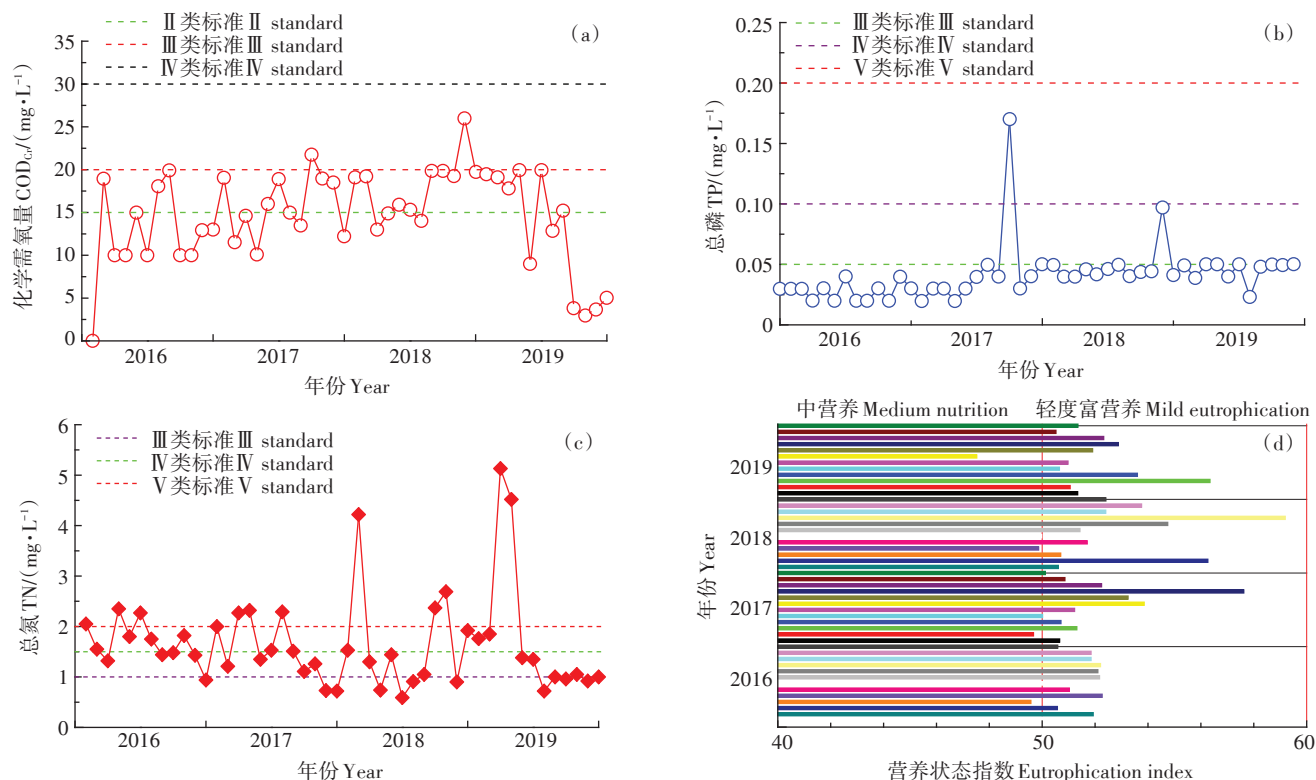


图2 尼山水库水质分析

Figure 2 Water quality of Nishan reservoir

(1) 张马河

张马河张马桥断面水质如图3所示。由图3可见, COD_{Cr} 浓度整体较低, 说明有机物污染不明显; TP 在8—9月基本满足Ⅳ类水质要求, 10—11月满足Ⅱ类水质要求; $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标总体较低; TN 超标严重, 以《地表水环境质量标准》Ⅲ类计, TN 指标在8—11月的22次监测中全部超标, 最大超标倍数达4.23倍。张马桥断面除TN外, 8—9月(丰水期)基本满足Ⅳ类水质要求, 10—11月(枯水期)满足Ⅲ类水质要求, 丰水期水质明显劣于枯水期。

(2) 母庄河

母庄河颜母大桥水质如图4所示。由图4可见, COD_{Cr} 浓度整体较低; TP 在8—9月基本满足Ⅳ类水质要求, 10—11月满足Ⅲ类水质要求; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较低; TN 超标严重, 以《地表水环境质量标准》Ⅲ类计, TN 指标在8—11月的22次监测中全部超标, 最大超标倍数达5.18倍。颜母大桥断面水质除TN外, 8—9月份基本满足Ⅳ类水质要求, 10—11月满足Ⅲ类水质要求, 丰水期水质明显劣于枯水期。

(3) 夫子洞河

夫子洞河夫子洞大桥水质如图5所示。由图5可见, 除8月份强降雨期间, TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 保持在Ⅲ类以

下, COD 基本保持在Ⅳ类以下, TN 也保持在Ⅴ类以下。夫子洞大桥断面的水质整体较张马河张马桥断面和母庄河颜母大桥断面好。

从22个样品的均值分析发现, 对于TN浓度来说, 张马河>母庄河>夫子洞河。从空间分布来看, 张马河位于流域的西南面, 母庄河位于流域的东南面, 夫子洞河位于流域的东北面。从土地利用类型分析, 张马河流域内耕地相对较多, 而夫子洞河流域内林地相对较多, 结合现场实际调查, 判断流域内TN污染主要由农药、化肥的使用引起, 应重点关注。

2.3 不同土地利用类型面源污染特征

为了研究不同土地利用类型对降雨形成的地表径流中污染物的影响, 根据流域实际分别选取玉米地、花生地、红薯地、核桃林和西长座村5个典型下垫面进行降雨径流采样分析, 结果如图6所示。

由图6可见, 玉米地TN和TP流失严重, 其中TN高达 $6.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超《地表水环境质量标准》Ⅴ类标准2.05倍, TP为 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超Ⅴ类标准1.38倍。花生地TP和TN流失严重, 浓度分别为 $1.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中TP在不同种植作物中流失浓度最大, 超Ⅴ类标准3.08倍。红薯地形成的地表径流中的污染物浓度整体较玉米地和花生地低, 其中TN浓度低于

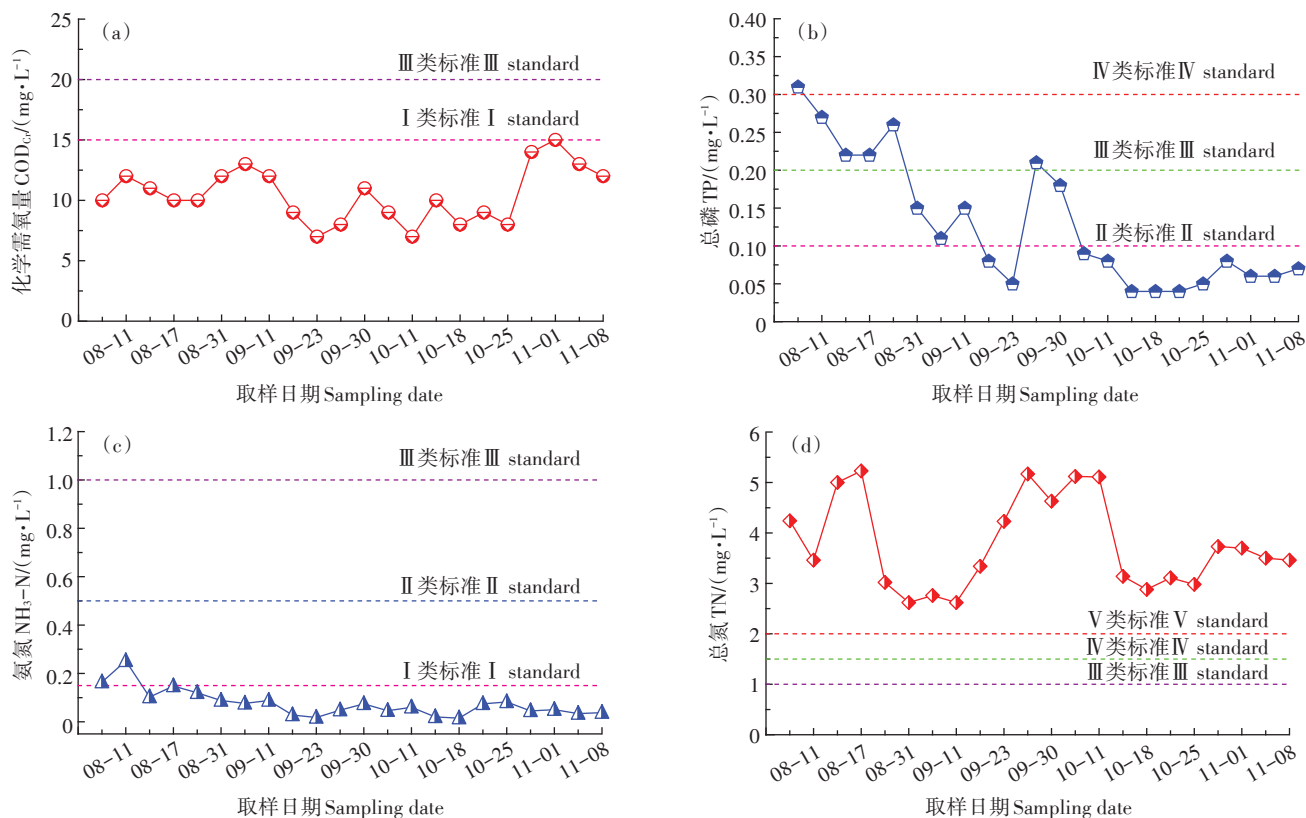


图3 张马桥断面水质

Figure 3 Water quality of Zhangma bridge

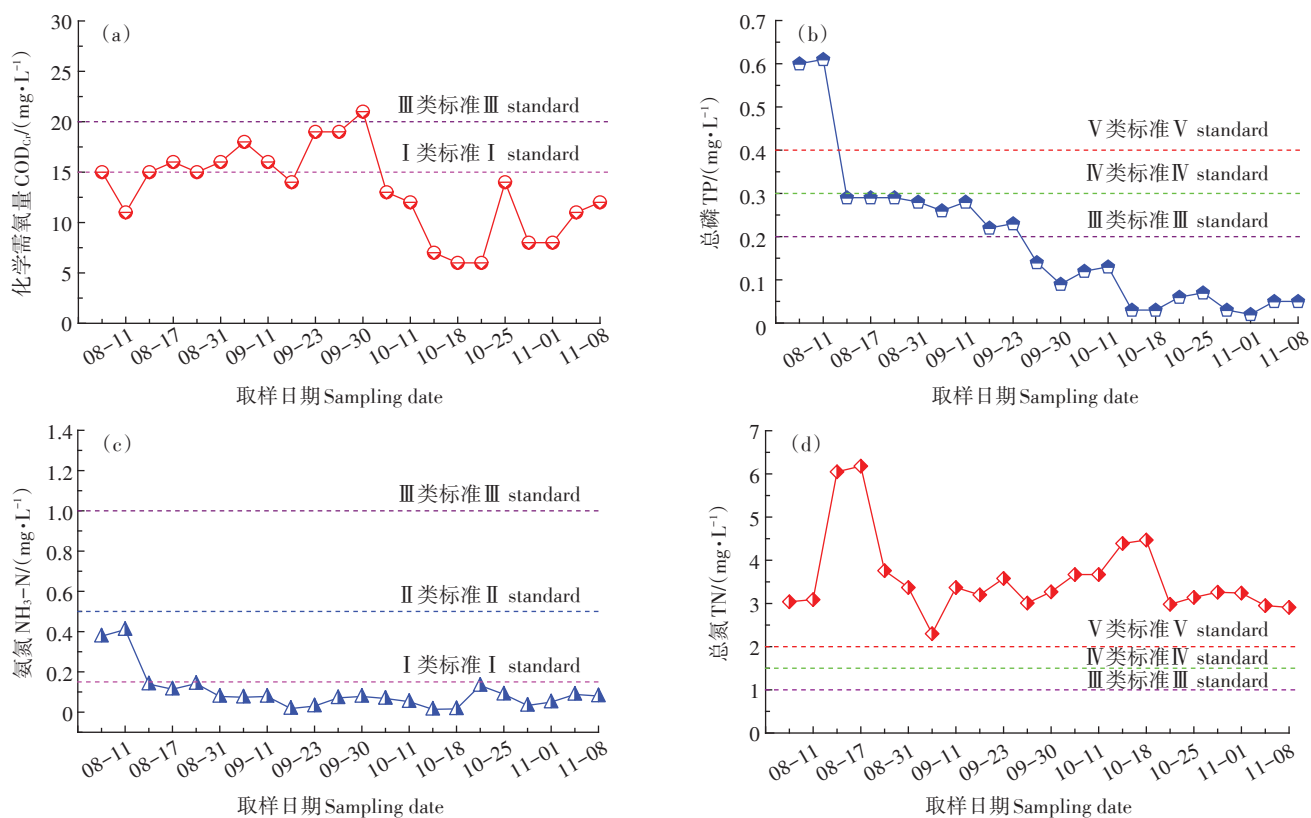


图4 颜母大桥断面水质

Figure 4 Water quality of Yanmu bridge

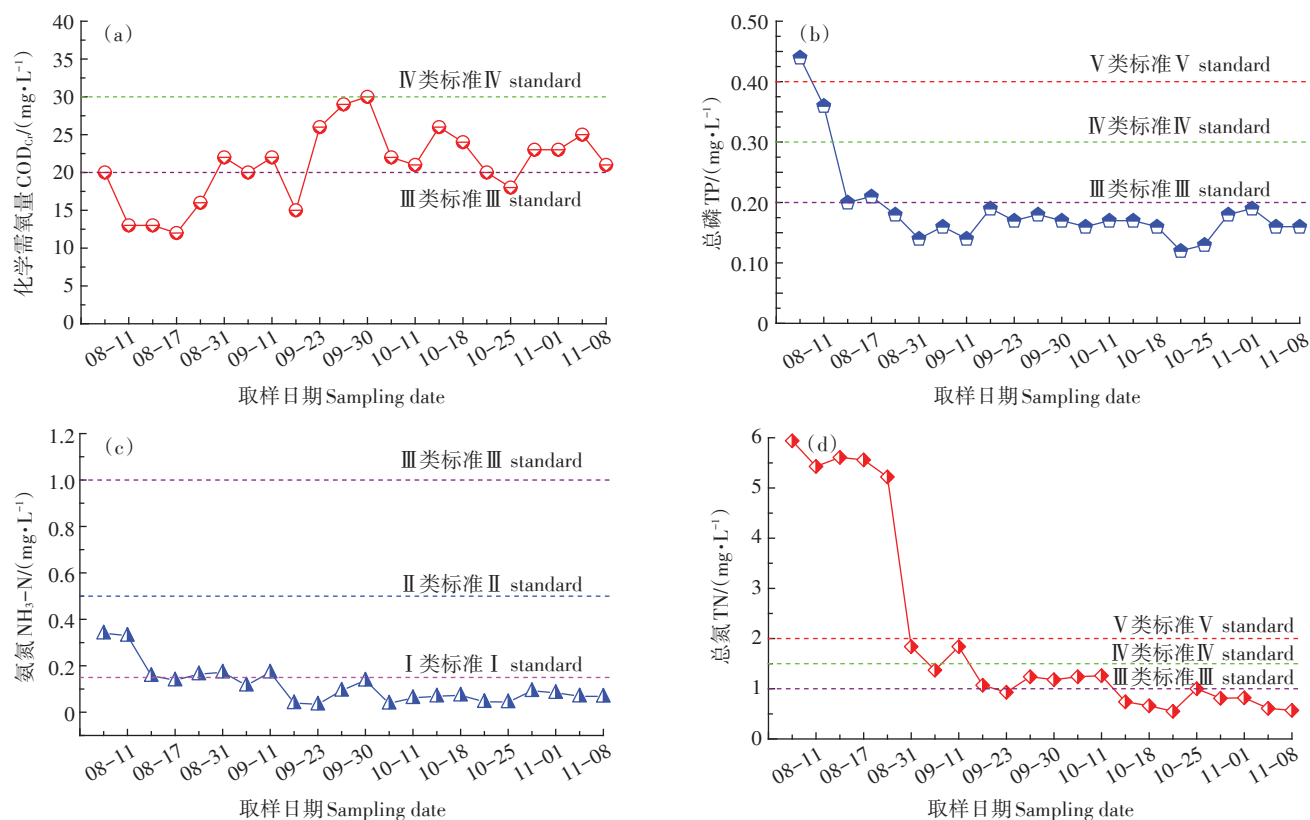


图5 夫子洞大桥水质

Figure 5 Water quality of Fuzidong bridge

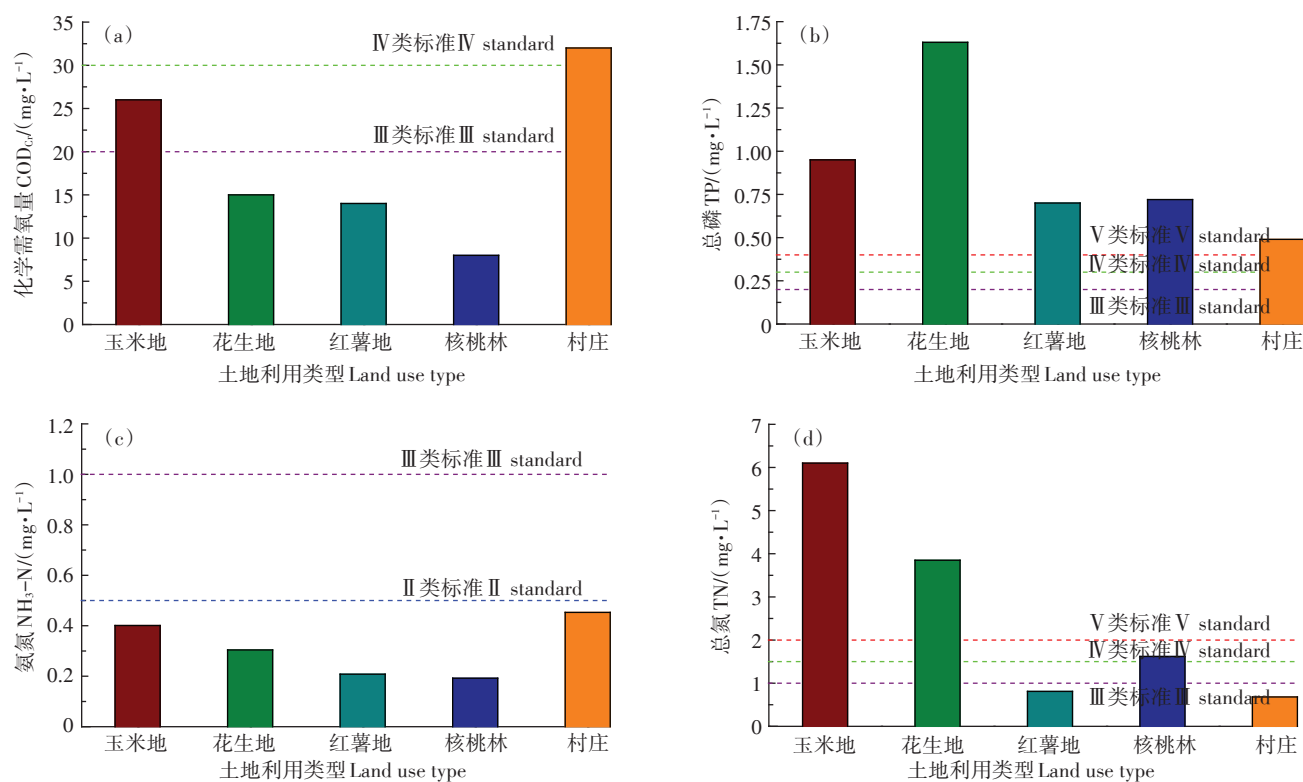


图6 不同土地利用类型地表径流中污染物浓度

Figure 6 Analysis of pollutants in surface runoff of different land use types

Ⅲ类水质标准,TP浓度相对较高,为 $0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超V类标准0.75倍。核桃林形成的径流整体污染浓度较低,主要污染物为TP,浓度为 $0.72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超V类标准0.80倍。村庄径流中主要污染物是 COD_{Cr} ,浓度为 $32.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在5种不同土地利用类型中最高,主要来源于生活污水、农村垃圾及畜禽粪便等。

2.4 降雨径流过程中面源污染特征

尼山水库流域内的土地利用以耕地为主,且库区周围有大量村庄聚居,对尼山水库的水质产生了影响。为此,本研究选取了村庄和耕地两种土地利用类型建立径流小区,分析降雨过程中的面源污染物流失规律及变化特征。

2.4.1 村庄径流中污染物流失特征分析

村庄面源污染流失随降雨径流变化如图7所示。由图7a可见,整个降雨过程中 COD_{Cr} 浓度为 $9.0\sim 43.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降雨初期出现劣V类水质; COD_{Cr} 最大值出现在径流最高值之前,且随着降雨的进行其浓度逐渐降低,降雨中后期趋于稳定。由图7b可见,在降雨过程中村庄的TP流失浓度为 $0.23\sim 0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均低于V类标准。由图7c可见,村庄的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在降雨过程中

的流失浓度总体较低,浓度范围为 $0.064\sim 0.278\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均低于Ⅱ类标准,且随着降雨的持续呈现降低的趋势。由图7d可见,在降雨过程中村庄的TN流失浓度为 $0.44\sim 1.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水质均低于V类标准;TN的最大值出现在降雨初期,且随着降雨的进行呈现降低的趋势。村庄径流小区的污染主要来源于生活污水、垃圾渗滤液及畜禽粪便等,在降雨前地表已积累了大量的污染物,所以降雨初期在地表径流的浸润、冲刷作用下污染物浓度出现最大值,且以有机污染为主。

2.4.2 玉米地径流中污染物流失特征分析

玉米地面源污染流失随降雨径流变化如图8所示。由图8a可见,玉米地的 COD_{Cr} 流失浓度为 $9.0\sim 52.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降雨初期出现劣V类水质; COD_{Cr} 的最大值与径流量最高值同步出现,且随着降雨的持续, COD_{Cr} 浓度逐渐降低。由图8b可见,玉米地的TP流失浓度较高,为 $0.28\sim 1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,整个降雨过程中92.59%的水质为劣V类;TP最大值出现在径流量最高值之前,且随着降雨的持续,污染物浓度逐渐降低。由图8c可见,玉米地的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在降雨过程中的流失浓度相对较低,浓度范围为 $0.197\sim 0.688\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均低

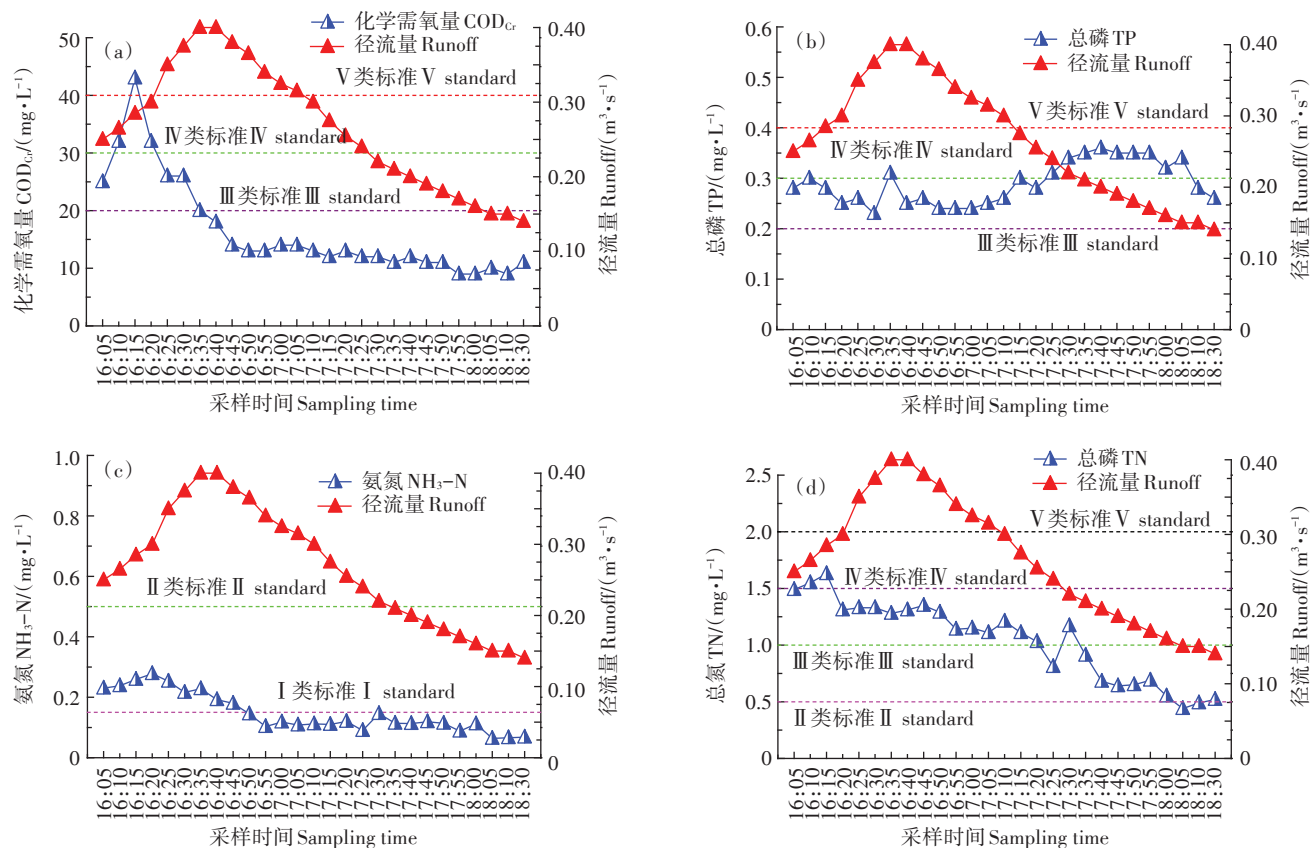


图7 村庄径流中污染物的变化

Figure 7 The change of pollutants with runoff in village

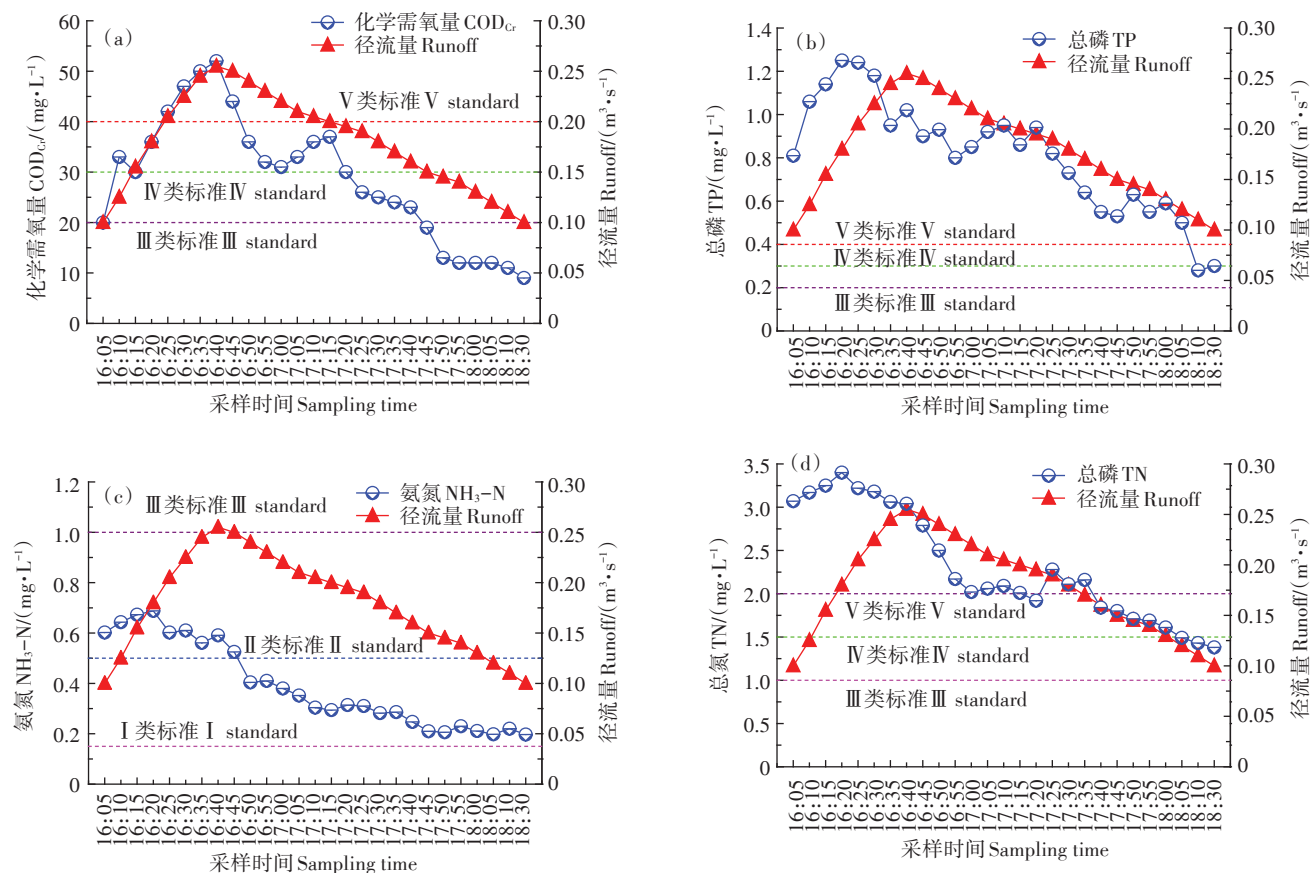


图8 玉米地径流中污染物的变化

Figure 8 The change of pollutants with runoff in corn field

于Ⅲ类标准,且流失浓度随着降雨的持续呈现降低的趋势。由图8d可见,玉米地的TN流失浓度较高,为 $1.38\sim 3.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,整个降雨过程中66.67%的水质为劣V类;TN的最高值出现在最大径流之前,且随着降雨的持续,TN的流失浓度逐渐减小。玉米地中污染物主要来源于肥料的施用、农药的喷洒、覆膜及秸秆的腐烂等,在降雨初期,植物截留、土壤吸收等作用使雨水滞留在农田中,但此时地表已积累了大量的污染物,随着降雨量的增加,多余的雨水通过地表径流等方式脱离农田系统,污染物的流失浓度出现最大值,且主要是氮和磷的营养盐污染。

3 讨论

尼山水库流域内耕地占整个流域的56.44%,2019年主要农作物播种面积 $7\,165.1\text{ hm}^2$,化肥使用量 $8\,533.6\text{ t}$,其中氮肥 $4\,809.5\text{ t}$ 、磷肥 $2\,986.7\text{ t}$ 、钾肥 716.8 t ,平均每公顷施用农家肥 $13\,247.3\text{ kg}$,施用化肥 $1\,191.0\text{ kg}$,而氮肥使用率仅为30%左右,因此有效防治种植业引起的面源污染是尼山水库面源污染防

控的头等大事。尼山水库主要的超标因子为TN,本研究结果表明4种不同种植类型(玉米地、花生地、红薯地、核桃林)中玉米地的TN流失浓度最大,而尼山水库流域种植主要以冬小麦-夏玉米为主,占整个耕地的78.31%。在小麦和玉米生产过程中,以氮肥为主的无机施肥模式依然占据主导地位,随水冲施、降雨撒施仍是主要的施肥模式^[17],因此,要降低尼山水库流域的农业面源污染,关键在于削减小麦-玉米地的氮磷,尤其是氮的径流流失。本研究结果显示,5种不同土地利用类型中TP的平均流失浓度表现为花生地>玉米地>核桃林>红薯地>村庄;TN的平均流失浓度表现为玉米地>花生地>核桃林>红薯地>村庄。朱波等^[18]对石盘丘小流域降雨径流进行了连续监测,分析了小流域不同土地利用类型地块的氮磷流失特点,结果表明TN和TP排放浓度依次为集镇>村落>柑橘果园>坡耕地>水稻田>林地,与本研究的结果存在差异,说明氮磷流失具有时间和空间的变异性,也表明了不同土地利用类型氮磷流失的不确定性及面源污染过程的复杂性。

不同作物氮磷的流失与降雨、施肥、植被覆盖及地形坡度等因素有关^[19]。从玉米地径流中污染物随径流量的变化可知,降雨初期是氮磷流失的关键期。冯小杰等^[20]的研究也发现在经历长时间的高温干旱后,雨滴打击土壤表层使土壤颗粒结构被破坏,大量的氮溶于雨水并随地表径流迁移,从而使地表径流的TN浓度骤增,随后TN浓度下降,认为是由于随着地表径流冲刷,表层土壤中易溶于水的氮素越来越少,同时雨水的下渗作用导致氮素通过壤中流损失,导致径流中氮素浓度迅速降低。邬燕虹等^[9]的研究发现降雨初期径流携带氮素的浓度最大,随后氮素浓度下降。林超文等^[21]研究了不同施肥方式在不同雨强条件下对土壤养分流失途径及流失量的影响,结果表明氮损失受雨强影响小,受施肥方式影响大,一次性施肥显著增加了氮的损失量。左继超等^[22]通过原位观测和模拟试验对比裸露处理与植被覆盖处理对磷流失的影响,结果表明植被截留、吸收等能有效降低径流中磷的污染负荷。陈仕奇等^[23]的研究发现当作物处于生长旺盛期时,叶片面积增大以及根系的发育可以降低表层土壤颗粒随径流流失的风险。王荣嘉等^[24]的试验也表明,鲁中南山区典型林地麻栎林的地表径流量、氮磷流失量均小于荒草地。

面源污染具有污染源的高度分散性及污染排放的时空不确定性,因而从源头控制污染物的产生尤为重要。可利用测土配方,按需施肥;利用水肥一体化技术,科学施肥;通过加高加固农田田埂,减少暴雨期间农田水体流出,从而从源头控制面源污染。薛利红等^[14]的研究发现作物产量与氮肥用量之间并不是简单的线性关系,而是二次函数关系,适当减少施氮量,不仅能提高产量,还能减少面源污染。谭德水等^[25]在南四湖沿岸小麦-玉米轮作区的研究发现,在玉米季采用测土配方施肥技术可比农户习惯性施肥方式减少化肥使用量,且作物产量不减,径流和淋溶无机氮可降低18%。黄程鹏等^[26]的研究发现山核桃地采用测土配方施肥可使氮流失量降低30%以上。在旱作生产中,发展水肥一体化技术(滴灌、喷灌),可有效提高水肥利用率,减少氮磷流失,并缓解土壤次生盐渍化问题。郭春霞等^[27]发现水肥一体化技术与传统施肥相比可节肥30%左右,硝酸盐淋洗减少1/3以上。此外,对于尼山水库流域的坡耕地应避免雨季表施,发展基于保护性耕作的土壤养分流失控制技术,如免耕技术、覆盖技术、横垄耕作技术等,可减少地表产流次数和径流量,降低氮磷养分流失,减少面源污染^[28]。

4 结论

(1)尼山水库主要超标因子为TN,具有发生水华的风险。水库的3条入库河流中,张马河和母庄河COD_{Cr}和NH₃-N相对较低,TN超标严重;夫子洞河水质相对较好。3条河流丰水期水质均明显劣于枯水期。

(2)总体来看,降雨过程中污染物流失浓度呈先上升后下降的趋势,降雨后期基本趋于稳定。这是由于降雨前地表已积累了大量的污染物,降雨初期在地表径流的浸润、冲刷作用下污染物浓度较大,所以初期雨水中污染物的流失值得关注。

(3)尼山水库流域耕地面源污染程度重于林地,在耕地的不同种植类型中,小麦-玉米地氮磷流失浓度高且种植面积最大,是尼山水库面源污染防治的关键。

参考文献:

- [1] 项颂, 吴越, 吕兴菊, 等. 洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2474-2483. XIANG S, WU Y, LÜ X J, et al. Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake basin and its classified control strategy[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2474-2483.
- [2] XUE L H, HOU P F, ZHANG Z Y, et al. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 304(10): 9-22.
- [3] 吴晓妮, 付登高, 彭珮媛, 等. 基于生态化学计量方法识别农业面源污染防控重点区域[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 160-165. WU X N, FU D G, PENG P Y, et al. Identifying key areas of agricultural non-point source pollution control based on ecological stoichiometry[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 160-165.
- [4] 王磊, 席运官, 潘阳, 等. 生态空间格局优化与景观要素耦合视角下环水有机农业面源污染控制技术[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 160-166. WANG L, XI Y G, PAN Y, et al. Agricultural non-point source pollution control technology based on coupling effects of agricultural spatial-pattern and landscape elements by developing organic agriculture in watershed areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 160-166.
- [5] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707-1716. CHEN C L, GAO M, NI J P, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges region[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1707-1716.
- [6] 潘雄, 林莉, 董磊, 等. 洱海典型小流域丰水期农业面源氮污染来源解析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 16-20, 27. PAN X, LIN L, DONG L, et al. Analysis on the sources of agricultural non-point nitrogen pollution in typical small watershed of Erhai Lake during the period of abundant water[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10): 16-20, 27.

- [7] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3825–3831. WU D, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3825–3831.
- [8] COGLE A L, KEATING M A, LANGFORD P A, et al. Runoff, soil loss and nutrient transport from cropping systems on Red Ferrosols in tropical northern Australia[J]. *Soil Research*, 2011, 49(1): 87–97.
- [9] 郭燕虹, 张丽萍, 陈儒章, 等. 坡长和雨强对氮素流失影响的模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 7–12, 39. WU Y H, ZHANG L P, CHEN R Z, et al. Research on the effect of slope length and rainfall intensity on nitrogen loss in sloping land under artificially simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 7–12, 39.
- [10] 徐梦, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 黔中水利枢纽不同土地利用类型土壤养分淋溶特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 25–30. XU M, LIU H Y, WU P, et al. Characteristics of soil nutrient leaching in different land use types of hydro-junction in central Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 25–30.
- [11] TONG Y, SHI J, HOU J M, et al. Effects of rainfall on reduction of urban non-points source pollution load in a low impact development (LID) residence community in Shanxi, China[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2020, 19(11): 2021–2028.
- [12] DONMEZ C, SARI O, BERBEROGLU S, et al. Improving the applicability of the SWAT model to simulate flow and nitrate dynamics in a flat data-scarce agricultural region in the Mediterranean[J]. *Water*, 2020, 12(12): 488–497.
- [13] 柳强, 王康, 罗彬, 等. 基于SWAT模型的涪江流域下垫面对面源污染负荷的影响分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 722–729. LIU Q, WANG K, LUO B, et al. Characterization of the impacts of underlying surface conditions of the Fujiang River basin on the non-point source pollution loads using the SWAT model[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 722–729.
- [14] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881–888. XUE L H, YANG L Z, SHI W M, et al. Reduce–retain–reuse–restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881–888.
- [15] SHEN Z Y, HONG Q, YU H, et al. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1971–1978.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 85–107. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 85–107.
- [17] 乔爱丽, 刘中良. 山东省玉米施肥现状、存在问题及对策[J]. 天津农业科学, 2017, 23(2): 35–37. QIAO A L, LIU Z L. Status and problems of fertilizing during corn production in Shandong and countermeasures[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2017, 23(2): 35–37.
- [18] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. 中国水土保持, 2010, 10(2): 34–36. ZHU B, WANG T, WANG J C, et al. Source and load of non-point source nutrients and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges reservoir area[J]. *China Soil and Water Conservation*, 2010, 10(2): 34–36.
- [19] ZHONG S Q, CHEN F X, XIE D T, et al. A three-dimensional and multi-source integrated technology system for controlling rural non-point source pollution in the Three Gorges reservoir area, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272(2): 172–184.
- [20] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩. 紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 43–48, 54. FENG X J, ZHENG Z C, LI T X. Characteristics of runoff and nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during corn growing season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 43–48, 54.
- [21] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1847–1854. LIN C W, LUO C Y, PANG L Y, et al. Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1847–1854.
- [22] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178–4186. ZUO J C, ZHENG H J, XI T X, et al. Characteristics of phosphorus output through runoff on a red soil slope under natural rainfall conditions[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4178–4186.
- [23] 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 等. 三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1276–1285. CHEN S Q, LONG Y, YAN D C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in Shipanqiu watershed, Three Gorges reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1276–1285.
- [24] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2732–2740. WANG R J, GAO P, LI C, et al. Characteristics of surface flow and interflow and nitrogen loss in *Quercus acutissima* forest land under simulated rainfall[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2732–2740.
- [25] 谭德水, 江丽华, 张骞, 等. 不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究: 以南四湖过水区粮田为例[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3488–3496. TAN D S, JIANG L H, ZHANG Q, et al. In situ study on influences of different fertilization patterns on inorganic nitrogen losses through leaching and runoff: A case of field in Nansi Lake basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3488–3496.
- [26] 黄程鹏, 吴家森, 许开平, 等. 不同施肥山核桃林氮磷径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 43–47. HUANG C P, WU J S, XU K P, et al. Runoff losses of nitrogen and phosphorus under *Carya cathayensis* Sarg. stand with different fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 43–47.
- [27] 郭春霞, 沈根祥, 黄丽华, 等. 精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 287–291. GUO C X, SHEN G X, HUANG L H, et al. Control of soil salinization and reduction of N & P loss with drip fertigation in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 287–291.
- [28] 辛艳, 王瑄, 邱野, 等. 耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3): 346–350. XIN Y, WANG X, QIU Y, et al. Discipline of nutrient losses from slope cropland in Liaoning Province under different cropping modes[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(3): 346–350.