

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2018.0105

张睿昊, 朱龙基, 王佰梅. 柳河流域特征污染物负荷模拟及污染源解析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 120-127.
ZHANG R H, ZHU L J, WANG B M. Simulation of characteristic pollutant load and analysis of pollution source in Liuhe River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 120-127. (in Chinese)

柳河流域特征污染物负荷模拟及污染源解析

张睿昊, 朱龙基, 王佰梅

(海河流域水资源保护局, 天津 300170)

摘要: 基于通用流域负荷模型(GWLF模型), 选取柳河流域为研究对象, 利用2006-2014年的水文水质数据进行水文化学过程的模拟, 评估流域节点断面的月径流量及特征污染物负荷通量, 根据模型结果分析了特征污染物的污染来源及贡献率。结果表明, 从年际变化上看, COD、氨氮和总氮的总负荷通量近年来有所下降, 总磷的总负荷通量呈逐年上升趋势。从年均水平上看, COD、氨氮的点源污染与非点源污染贡献率相差不大, 均接近50%; 总氮的非点源污染贡献率远远高于点源污染, 贡献率高达79.6%; 总磷的污染来源主要为点源污染, 贡献率高达74.9%。根据特征污染物的污染源解析结果, 提出有针对性的削减和控制污染的措施, 为流域水污染管控提供依据。

关键词: 柳河流域; GWLF模型; 污染负荷; 污染源解析

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0120-08

Simulation of characteristic pollutant load and analysis of pollution source in Liuhe River basin

ZHANG Ruihao, ZHU Longji, WANG Baimei

(Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin, Tianjin 300170, China)

Abstract: The generalized watershed loading function (GWLF) model was used in this paper to simulate the hydrochemical process of Liuhe River basin from 2006 to 2014, and to evaluate the monthly water flow and the load fluxes of characteristic pollutants in the basin. According to the model results, we analyzed the sources of the characteristic pollutants and their contribution rates. The results showed that in terms of interannual variation, the total load flux of COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen decreased in recent years, and the total load flux of total phosphorus increased year by year. In terms of annual average level, the point source pollution and non-point source pollution made basically equivalent contributions to COD and ammonia nitrogen, both approaching 50%. For total nitrogen, the non-point source pollution had a much higher contribution rate (up to 79.6%) than the point source pollution. The main pollution source of total phosphorus was point source pollution, whose contribution rate was up to 74.9%.

Key words: Liuhe River basin; GWLF model; pollution load; analysis of pollution source

随着社会经济和城市化进程的迅猛发展, 人类活动对水环境的影响日益显著, 水环境状况和水生态功能受到严重威胁, 水资源短缺、水体污染、水生态恶化等问题不断凸显^[1]。目前工业点源尚未得到有效控制, 城镇污水处理率较低, 导致入河的COD

和氨氮排放量较高, 甚至超过其水体环境容量^[2,3]。非点源污染物对水体污染的贡献日益增加, 特别是农业非点源污染源中氮、磷等营养物质大量进入河流湖库, 成为水体富营养化和水质恶化的重要原因^[4,6]。流域作为水文循环单元, 点源和非点源污染

收稿日期: 2017-10-19 修回日期: 2018-04-06 网络出版时间: 2018-04-26
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180424.1755.007.html>
基金项目: 中央分成水资源费项目(1261520411604)
Fund: Central Water Resources Fee Project (1261520411604)
作者简介: 张睿昊(1989), 女, 山东东营人, 工程师, 主要从事水资源保护工作。E-mail: zhangruihao89@163.com

物经支流汇入干流而影响水环境和水生态系统,在流域尺度上分析土地利用类型研究污染类型是开展水环境保护与管理的大势所趋^[7-10]。流域污染与水文循环过程密切相关,加之非点源污染的广泛性、多重性、模糊性、潜伏性及难监测性等特点,增加了解析流域污染源特别是非点源污染来源的难度^[11-12]。通过流域污染模型定量模拟水文和污染物过程,解析污染源组成,分析污染负荷分布特征,评估土地利用对污染负荷和水质的影响,可为水环境管理提供决策支持^[13-16]。

柳河流域作为潘家口水库重要水源地上游的主要汇水区域之一,其污染状况直接影响水库的水资源质量,研究柳河流域污染物负荷和来源对保护水源地水环境具有重要意义。根据国家水污染控制指标,以柳河流域作为研究对象,结合点源污染和非点源污染的主要污染物,选取 COD、氨氮、总氮、总磷作为特征污染物,利用 GWLF 模型系统评估柳河流域特征污染物负荷量,识别关键污染贡献源,提出针对不同污染源的削减和控制措施,为该流域的水污染管控和水资源保护提供技术依据。

1 研究区概况

柳河发源于河北省承德市兴隆县六里坪的柳源湖,流经河北省兴隆县、承德县和鹰手营子矿区三区,与滦河相汇,流入潘家口水库。选取“石佛”水文测站为水文节点断面,“柳河桥”水质测站为水质节点断面,研究范围涵盖柳河流域,流域总面积 1 026 01 km²。研究区范围见图 1。

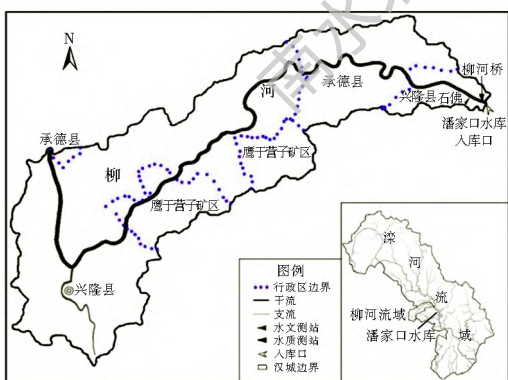


图 1 柳河流域研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Liuhe River basin

研究区大部分位于兴隆县内,兴隆县属燕山石质山区,地势西北高,东南低,以丘陵地带为主,形成了西北向东南倾斜的塔形地势,是典型的深山区^[17]。随着县域经济的不断发展,城镇化发展进程的不断加快,对水资源的要求量增加,水资源供需矛

盾日益突出。在水土流失方面,2011 年底兴隆县水利侵蚀面积为 996 29 km², 树下水土流失、土壤沙化相对严重,大部分开采区水土流失遗留问题普遍存在,植被破坏,恢复能力较差^[17]。2015 年底,全县地区生产总值完成 94.5 亿元,增长 4%^[18]。流域为典型半干旱季风气候区,多年平均气温 8.4℃,多年平均降水量 572 mm,多年平均径流深 69.3 mm,降雨主要集中在汛期(6 月-9 月),约占全年降水量的 60%~70%。研究区内土地利用类型主要有林地 328.20 km²,灌木林 237.64 km²,疏林地 3.89 km²,其他林地 6.20 km²,高覆盖度草地 157.22 km²,中覆盖度草地 127.45 km²,低覆盖度草地 0.12 km²,旱地 128.98 km²,河渠 9.66 km²,水库坑塘 0.68 km²,滩地 0.42 km²,城镇用地 15.39 km²,农村居民点 8.07 km²,其他建设用地 2.10 km²。流域内的常住人口约 63.4 万人。

2 GWLF 模型设计

2.1 模型概述

通用流域污染负荷 (Generalized Watershed Loading Function, 简称 GWLF) 模型是 1987 年由美国的 Haith 和 Shoemaker 共同开发的,用于模拟流域内不同土地利用类型所产生的月均河川径流、土壤侵蚀、沉积物量以及由其产生的氮磷月负荷量^[19]。GWLF 模型被美国 EPA 认定为中尺度的模型,最佳适用流域范围为 100 km² 至 2 000 km²。GWLF 模型具有模拟过程简单、机理简单、数据要求少、模拟结果可靠等特征,比较适合水文水质数据相对缺乏的地区进行沉积物、营养盐的计算^[20]。作为管理决策支持的有效工具, GWLF 模型在多个国家和地区的流域水环境管理工作中得到了成功应用^[21-26]。

GWLF 模型针对水文过程的模拟,利用 SCS 曲线方法对地表径流过程评估,根据水量平衡的经验公式推求浅层饱和区地下水层含水量,将地表径流与地下水潜流累积,最终模拟流域完整的水文过程。GWLF 模型针对泥沙的模拟,对农村土地利用类型上由水土流失过程到达流域出口的沉积量。GWLF 模型针对污染物的模拟,主要包括溶解形态污染物和固相形态污染物,分别通过河川径流和泥沙传输,通过累加流域内不同土地利用对非点源污染的贡献率得到流域非点源污染负荷总量。针对 COD,使用比例系数区分可将降解部分和不可降解部分分别进行模拟。针对氨氮,基于模型中总氮的模拟引入面向氨氮特征的参数进

行模拟。模型设计见表 1。

表 1 模型设计
Tab. 1 Model design

| 选项 | 参数 |
|--------|--------------------|
| 模型校准函数 | 纳氏系数(R_{NS}^2) |
| 特征污染物 | COD、氨氮、总氮、总磷 |
| 模型方案 | 负荷通量、污染源解析 |

2.2 数据来源与处理

评估柳河流域面源污染负荷所需的流域基础环境信息主要包括流域河网、各种土地利用类型在流域上的面积、流域内常住农业人口、河道周边常住人口、污染源普查数据,以及逐日的降水量和平均气温等信息。模型输入所需的原始数据来源见表 2^[23, 27]。

表 2 原始数据来源
Tab. 2 Data source

| 来源 | 精度属性 |
|---------------|------------------------|
| 中国科学院科学数据库 | 30 m × 30 m (2009 年) |
| 地球系统科学数据共享平台 | 1 km × 1 km (2000 年) |
| 地球系统科学数据共享平台 | 1 km × 1 km (2003 年) |
| 中华人民共和国水文年鉴 | 石佛站日降水量(2006–2014 年) |
| 中国气象科学数据共享服务网 | 石佛站日平均气温(2006–2014 年) |
| 中华人民共和国水文年鉴 | 石佛站日径流量数据(2006–2014 年) |
| 水利部海河水利委员会 | 柳河桥站月水质数据(2006–2014 年) |
| 水利部海河水利委员会 | 废污水年入河量(2014 年) |

针对基础数据的预处理,主要基于 ArcGIS 9.3 软件平台进行。主要包括流域河网的生成与流域划分、气象数据的获取和转化、土地利用类型面积

的核算、面向模型需要的人口数据统计,以及对基于区县的污染普查数据向模型所需流域化数据的处理转化。

2.3 模型校准函数

选取纳氏系数(R_{NS}^2)作为模型校准的目标函数,对模拟结果进行有效性验证。

$$R_{NS}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{m_i} - Q_{r_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{r_i} - Q_x)^2} \quad (1)$$

式中: Q_{m_i} 为第*i*月的模拟值; Q_{r_i} 为第*i*月的实测值; Q_r 为实测值月平均值; n 为模拟的总月数。 R_{NS}^2 通常在 0~1 之间,数值越大,说明模型模拟的匹配度越好;当 R_{NS}^2 为 1 时,模拟值等于实测值,模拟精度最高;当 R_{NS}^2 小于 0 时,则说明模型模拟的匹配低,模拟结果不可信。

2.4 模型验证

2.4.1 水文过程验证

以“石佛”水文测站为流域水文节点,利用 2006 年至 2014 年的逐月实测水量数据,对柳河流域的 GWLF 模型水文参数进行了校准,得到相应的校准参数数据集,模拟得到了 2006 年至 2014 年逐月的模拟水量,并将模拟结果与实测水量结果进行比较,其结果见图 2。模型对地表径流量的计算基于日气象数据,使用 SCS-CN 径流曲线方程,针对目标流域区域内不同土地利用类型区,核算其径流深(cm),作为表征地表径流量的模拟结果。计算可知,模型模拟的纳西效率系数为 0.89,校准后的 GWLF 模型可有效刻画柳河流域的水文过程。

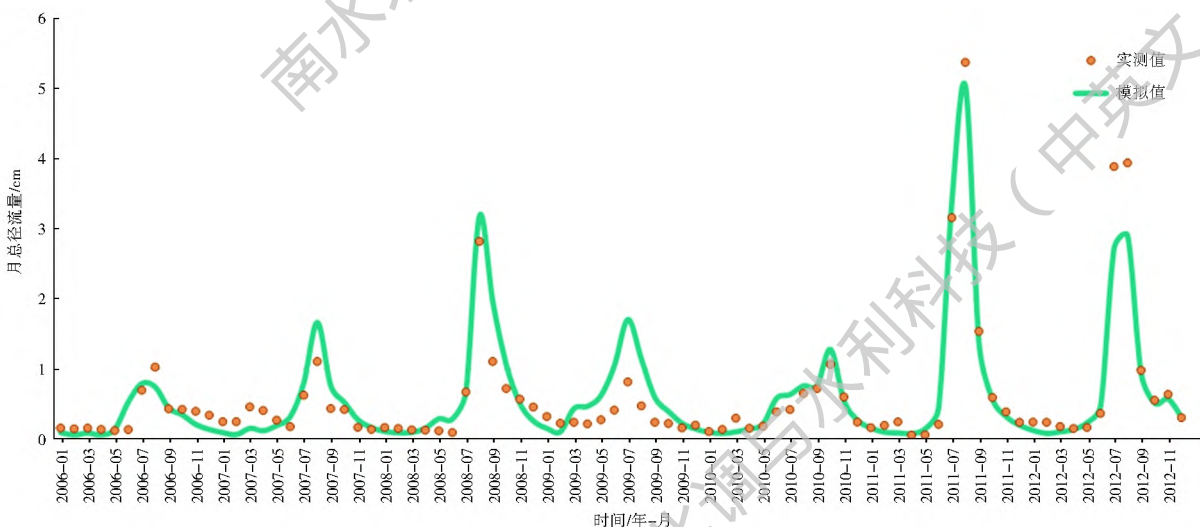


图 2 柳河流域月水量模拟结果

Fig. 2 Simulation results of monthly water flow in Liuhe River basin

2.4.2 污染物负荷通量验证

以“柳河桥”水质测站为流域水质节点,2006 年

至 2014 年的月水质监测数据,对柳河流域的 GWLF 模型水质参数进行了校准,分别得到对应

COD、氨氮、总氮和总磷的校准参数数据集, 模拟得到 2006 年至 2014 年逐月的污染物通量, 并将模拟结果与实测污染物负荷通量结果进行比较, 其结果见图 3。计算可知, 针对 COD 污染物月负荷通量的模型模拟的纳西效率系数为 0.47, 针对氨氮污染物月负荷通量的模型模拟的纳西效率系数为 0.42, 针对总氮污染物月负荷通量的模型模拟的纳西效率系数为 0.60, 针对总磷污染物月负荷通量的模型模拟的纳西效率系数为 0.42。GWLF 模型在日尺度上水

量平衡计算, 若某月发生短历时的强降雨-径流, 会导致模型模拟该月的峰值较低, Haith 等对模型的应用中曾提到 GWLF 模型对负荷峰值模拟偏低可达 35%^[28]。流域污染源管理中关注的不是某个月份的污染源解析, 而是年份尺度和多年平均的污染源组成。因此对某些负荷峰值的低估并不影响结果分析, 校准后的 GWLF 模型对各特征污染物的模拟系数满足面向管理支持的精度需求, 模型可对柳河流域中的典型污染物迁移转化行为进行有效模拟。

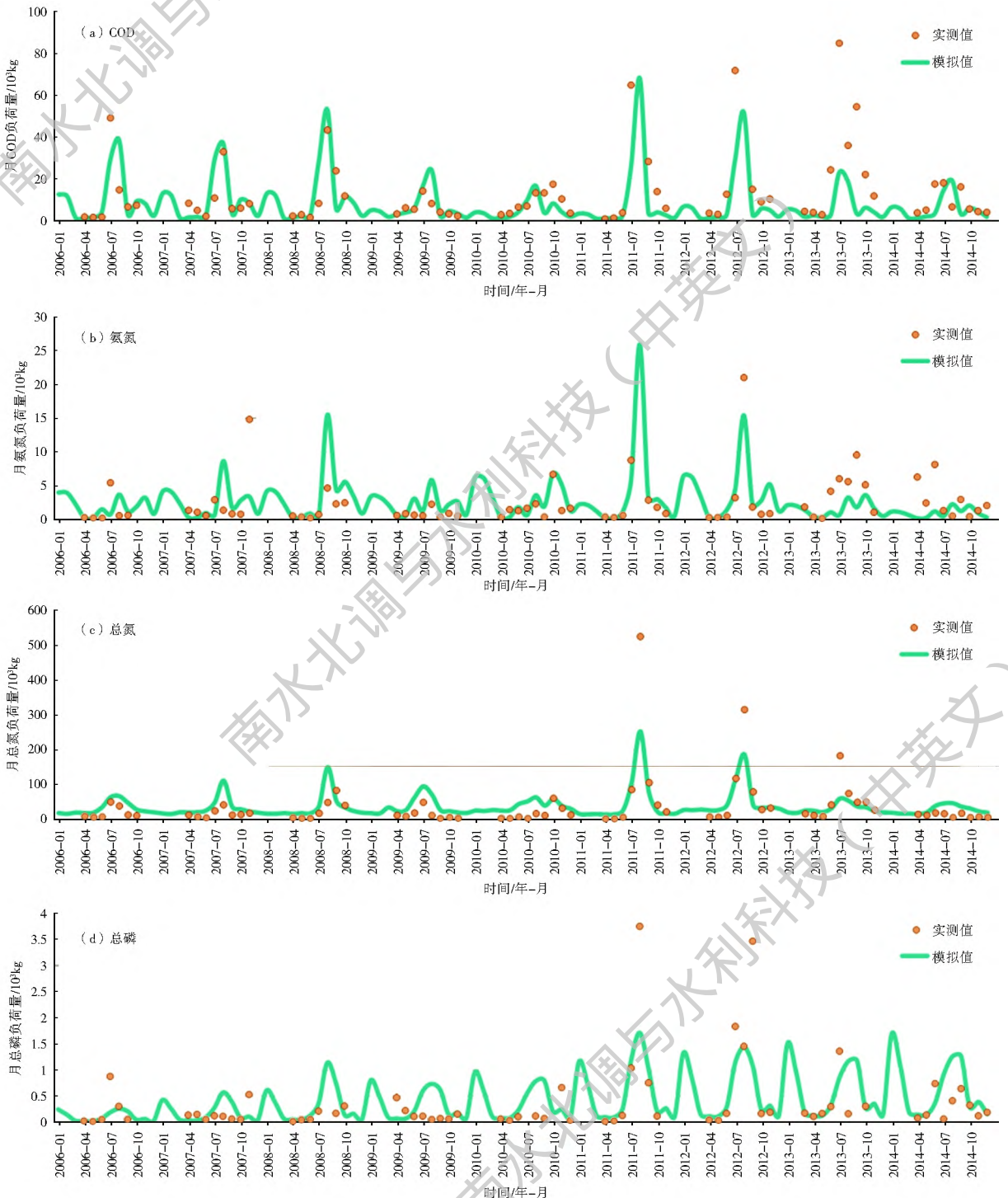


图3 柳河流域月污染物通量模拟结果

Fig. 3 Simulation results of monthly pollutants fluxes in the Liuhe River basin

3 结果与分析

3.1 污染物负荷通量及来源解析

3.1.1 COD 污染负荷通量及来源解析

柳河流域 2006–2014 年 COD 污染物年负荷通量在 61.37 t 到 142.00 t 之间, 多年平均负荷通量为 101.13 t, 总体随时间呈现下降趋势, 2008 年 COD 污染物年负荷通量最高, 2009–2010 年、2013–2014 年的负荷通量相对较小。COD 污染来源基本上以点源为主, 仅 2011 年林地源所产生的污染负荷最大, 根据多年平均污染负荷通量计算可知, COD 污染以点源为主, 占到总负荷通量的 47.9%, 其次为农村生活源占 21.7%, 林地源也有一定贡献占 15.5%。COD 污染物年负荷通量及各污染源比例见图 4 和图 5。

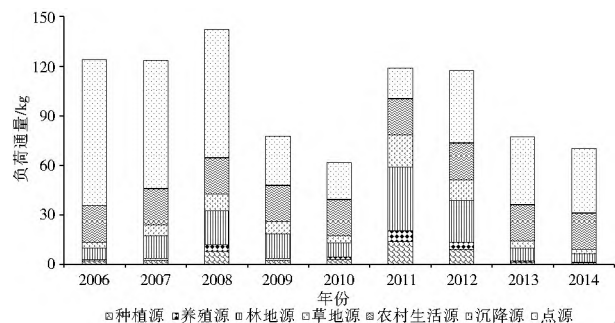


图 4 柳河流域 2006–2014 年 COD 污染物年负荷通量
Fig. 4 Annual load fluxes of COD pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

源也占到 14.4%。氨氮污染物年负荷通量及各污染源比例见图 6 和图 7。

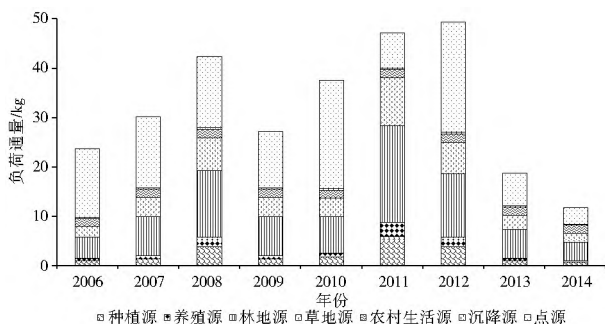


图 6 柳河流域 2006–2014 年氨氮污染物年负荷通量
Fig. 6 Annual load fluxes of ammonia nitrogen pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

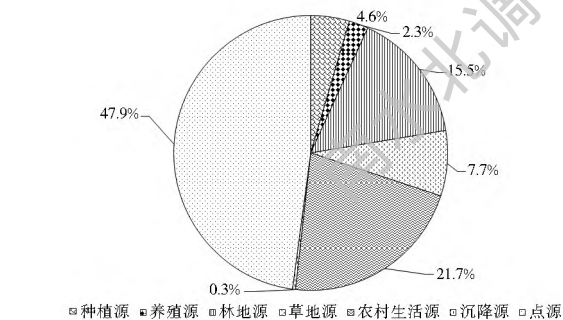


图 5 柳河流域 2006–2014 年 COD 污染物多年平均负荷通量比例

Fig. 5 The ratio of multi year average load flux of COD pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

3.1.2 氨氮污染负荷通量及来源解析

柳河流域 2006–2014 年氨氮污染物年负荷通量在 11.61 t 到 49.32 t 之间, 多年平均负荷通量为 31.91 t, 年际间变化较大, 无明显变化趋势, 2013–2014 年的负荷通量相对较小。根据多年平均污染负荷通量计算可知, 氨氮污染以点源为主, 占到总负荷通量的 40.2%, 林地源次之, 占比为 28.9%, 草地

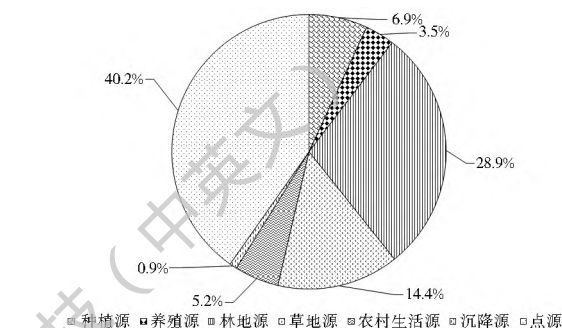


图 7 柳河流域 2006–2014 年氨氮污染物多年平均负荷通量比例

Fig. 7 The ratio of multi year average load flux of ammonia nitrogen pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

3.1.3 总氮污染负荷通量及来源解析

柳河流域 2006–2014 年总氮年负荷通量在 346.53 t 到 635.12 t 之间, 多年平均负荷通量为 458.81 t, 2006–2012 年呈现逐年上升的趋势, 2013–2014 年有大幅度下降, 年负荷通量均低于 400 t。根据多年平均污染负荷通量计算可知, 总氮污染以农村生活源为主, 占到总负荷通量的 53.4%, 其次为点源, 占比为 20.4%。总氮污染物年负荷通量及各污染源比例见图 8 和图 9。

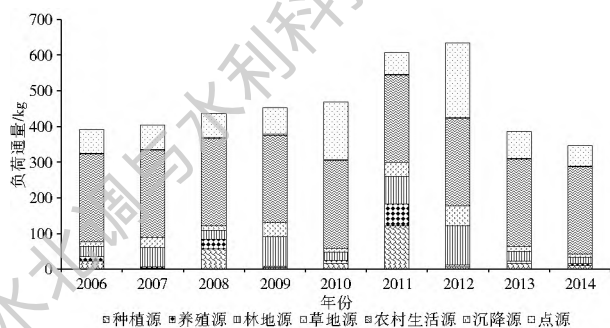


图 8 柳河流域 2006–2014 年总氮污染物年负荷通量
Fig. 8 Annual load fluxes of total nitrogen pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

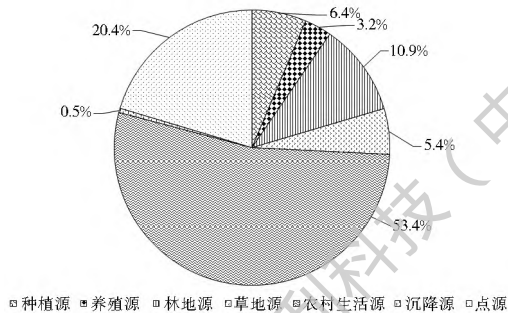


图9 柳河流域 2006-2014年总氮污染物多年平均负荷通量比例

Fig. 9 The ratio of multi-year average load flux of total nitrogen pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

3.1.4 总磷污染负荷通量及来源解析

柳河流域 2006-2014 年总磷年负荷通量在 1.37 t 到 7.92 t 之间, 多年平均负荷通量为 5.16 t, 呈现逐年上升的趋势, 2011 增幅较大, 2011-2014 年年负荷通量均在 7 t 以上。根据多年平均污染负荷通量计算可知, 总磷污染以点源为主, 占到总负荷通量的 74.9%, 其次为农村生活源占 7.3%, 种植源和林地源也有一定贡献, 分别占 6.5% 和 6.1%。总磷污染物年负荷通量及各污染源比例见图 10 和图 11。

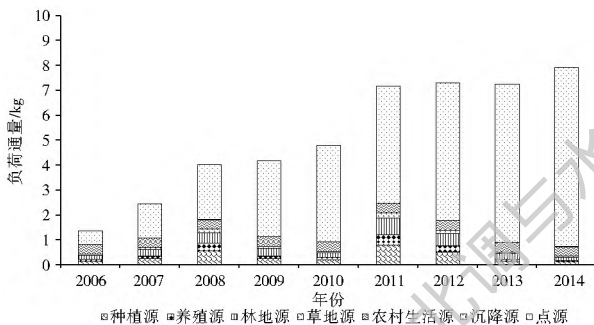


图10 柳河流域 2006-2014年总磷污染物年负荷通量

Fig. 10 Annual load fluxes of total phosphorus pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

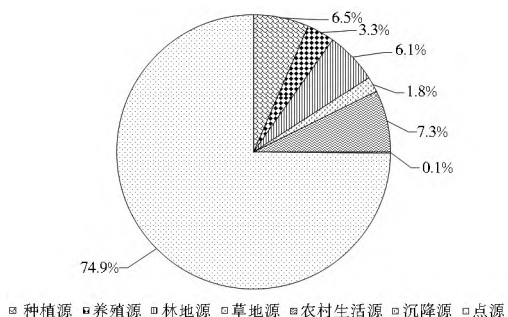


图11 柳河流域 2006-2014年总磷污染物多年平均负荷通量比例

Fig. 11 The ratio of multi-year average load flux of total phosphorus pollutants in Liuhe River basin from 2006 to 2014

3.2 分析与讨论

从年际变化上看, 2006-2014 年 COD 和氨氮

的负荷通量总体上无明显变化趋势, 在 2013 年和 2014 年均有所下降, 总氮的负荷通量呈现先上升后下降的趋势, 在 2012 年达到最大, 2013 年和 2014 年有较大幅度的减少, 总磷的负荷通量呈逐年上升趋势。这主要是近年来柳河流域内部分企业和生活等排污口并入城镇管网, 废污水经污水处理厂处理后排出, 有效降低了 COD、氨氮和氮氮的点源排放量, 而煤矿厂和钢铁厂等企业增多, 生产过程中脱磷环节导致工业废水中磷的点源排放量增大。此外, 位于流域内的兴隆县开展小流域生态清洁建设, 实施植树造林、退耕还林等水土保持措施, 减少了土壤侵蚀量, 提高了流域蓄水能力, 使得随径流和泥沙进入水体的非点源污染负荷有所减少。

从年均水平上看, COD、氨氮的点源污染与非点源污染贡献率相差不大, 均接近 50%, 点源污染贡献率均在 40% 以上, 非点源污染中农村生活源、林地源和草地源的贡献相对较大; 总氮的非点源污染贡献率远远高于点源污染, 其中以农村生活源污染为主, 贡献率为 53.4%, 其次为点源污染和林地源污染; 总磷的污染来源主要为点源污染, 贡献率高达 74.9%, 其次为农村生活源、种植源和林地源的污染。由此可知, 柳河流域 COD、氨氮和总氮的非点源污染较为严重, 而磷的非点源污染不是非常严重。由于磷在一般土壤中浓度很低, 且溶解性磷在土壤中主要进行吸附作用, 而该流域土地利用类型以林地为主, 占流域总面积的 56.1%, 因此植被覆盖降低了土壤颗粒上吸附态磷的流失, 导致非点源污染中磷负荷量相对较少。

4 结语

以柳河流域为研究区域, 采用通用流域污染负荷(GWLF)模型, 对 COD、氨氮、总氮、总磷等特征污染物进行负荷通量与污染源解析, 根据不同特征污染物的污染源贡献比例分析可知, 柳河流域污染以点源和农村生活源为主。因此, 建议柳河流域主要采取措施对点源污染和农村生活源进行治理。通过排污口规范化建设、生态净化和截污导流等工程重点整治点源污染, 通过清洁小流域治理、农村垃圾收集和运转、农村生活污水集中处理等方式有效控制农村生活源污染。同时, 科学指导开展农村清洁生产, 以农家肥、有机肥为主, 限制农用化学品特别是氮肥的使用量, 防治种植源、林地源和草地源的污染。

参考文献(References):

[1] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学,

- 2007, 27(5): 712-716. (MENG W. The strategy of comprehensive pollution prevention and cure of water environment in Chinese watershed. [J]. China Environmental Science, 2007, 27(5): 712-716. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2007.05.029.
- [2] 郭鹏, 吴培任, 任静. 南水北调东线主要污染物入河量历年变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 62-66. (GUO P, WU P R, REN J. Analysis of annual variation of main pollutants discharge into the river along the eastern route of South to North water diversion project[J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 62-66. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.06062.
- [3] 刘方圆, 梁忠民, 张建华, 等. 江苏省淮河流域水功能区达标评价及限排总量[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 51-54, 82. (LIU F Y, LIANG Z M, ZHANG J H, et al. Standard achievement evaluation of water function zones and total limited pollution in the Huaihe river basin of Jiangsu province[J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 51-54, 82. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.01.012.
- [4] 曹高明, 杜强, 宫辉力, 等. 非点源污染研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 35-40. (CAO G M, DU Q, GONG H L, et al. A review of nonpoint source pollution study [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1): 35-40. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2011.01.007.
- [5] 宋文龙, 杨胜天, 朗杨, 等. 渭河流域大尺度非点源 COD 污染负荷估算[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 31-36. (SONG W L, YANG S T, LANG Y, et al. Evaluation of pollution load for large scale and nonpoint source COD in Weihe basin[J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 31-36. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.06031.
- [6] 张静, 何俊仕, 周飞, 等. 浑河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 69-73. (ZHANG J, HE J S, ZHOU F, et al. Estimation and evaluation of nonpoint source pollution in the Hunhe river basin[J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.06069.
- [7] 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 265-272. (CHENG X, CHEN L D, SUN R H. Estimation of nonpoint source pollution loads of Beijing Tianjin Hebei region considering precipitation and topography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 265-272. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.036.
- [8] 耿润哲, 李明涛, 王晓燕, 等. 基于 SWAT 模型的流域土地利用格局变化对非点源污染的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 241-250. (GENG R Z, LI M T, WANG X Y, et al. Effect of land use/landscape changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 241-250. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.032.
- [9] 李明涛. 密云水库流域土地利用与气候变化对非点源氮、磷污染的影响研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2014. (LI M T. Impacts of land use and climate changes on nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution in the Miyun reservoir watershed [D]. Beijing: Capital Normal University, 2014. (in Chinese))
- [10] 赵越, 张富, 陈瑾, 等. 安家沟流域不同土地利用方式下地表径流中 COD 和 TN 的污染负荷[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 103-108, 114. (ZHAO Y, ZHANG F, CHEN J, et al. COD and TN pollution loads in surface runoff under different land uses in Anjiagou basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 103-108, 114. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.01.011.
- [11] 徐建新, 高彦君, 谷红梅, 等. 秦皇岛滨海地区地表径流及污染负荷估算[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 50-53, 104. (XU J X, GAO Y J, GU H M, et al. Estimation of surface runoff and pollution load in the coastal region of Qinghuangdao[J]. South to North Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 50-53, 104. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01050.
- [12] 金树权, 吕军. 水环境非点源污染模型的研究进展和展望[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1022-1026. (JIN S Q, LU J. Research progress and prospect on nonpoint source pollution models in water environment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 1022-1026. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.05.042.
- [13] 王康, 冉宁, 张仁锋, 等. 流域面源污染负荷差异性及其不确定性的尺度特性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 211-218. (WANG K, RAN N, ZHANG R D, et al. Analysis on characterization of heterogeneities and uncertainty for nonpoint source pollution loads at different basin scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 211-218. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.11.027.
- [14] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 941-952. (XIA J, ZHANG X Y, ZHANG Y Y. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models[J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 941-952. (in Chinese))
- [15] 王慧亮, 孙志琢, 李叙勇, 等. 非点源污染负荷模型的选择与比较[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 176-182. (WANG H L, SUN Z Z, LI X Y, et al. Comparison and selection among nonpoint pollution models [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(5): 176-182. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6504.2013.05.035.
- [16] THOMAS W, SETH T, THOMAS D. Modelers' and outreach professionals' views on the role of models in watershed management[J]. Environmental Policy & Governance, 2011, 21(6): 472-486. DOI: 10.1002/eet.587
- [17] 杨占军. 兴隆县水生态环境现状及对策[J]. 河北水利, 2015(4): 45. (YANG Z J. Current situation and countermeasures of water ecological environment in Xinglong county[J]. Hebei Water Resources, 2015(4): 45. (in Chinese))

- [18] 李呈祥. 依邻发展铸就稳步增长之路 兴隆县以京津冀协同发展助推兴隆社会经济发展纪实[EB/OL]. <http://www.hbxl.gov.cn/article/20160125/0009669722016-02660.html>. 2016-01-25 (2018-01-16). (LI C X. In accordance with the development of adjacent development, the steady growth of the road-xinglong county[EB/OL]. <http://www.hbxl.gov.cn/article/20160125/0009669722016-02660.html>. 2016-01-25. (in Chinese))
- [19] HAITH D A, SHOEMAKER L L. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients I[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1987, 23(3): 471-478. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1987.tb00825.x
- [20] 王玉秋, 沙健, 谢阳村, 等. 通用流域负荷模型(GWLF模型)理论方法与应用案例[M]. 北京: 中国环境出版社, 2012. (WANG Y Q, SHA J, XIE Y C, et al. The theoretical method and application case of general watershed load function (GWLF) model[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012. (in Chinese))
- [21] 杜新忠, 李叙勇, 张汪寿, 等. 基于GWLF模型的流域总氮负荷模拟及污染源解析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 19-23. (DU X Z, LI X Y, ZHANG W S, et al. Simulation of total nitrogen load in watershed and analysis of pollution source based on GWLF model[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(3): 19-23. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.04.
- [22] 王东, 赵越, 徐敏, 等. 区域营养盐管理模型在沙河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 98-101. (WANG D, ZHAO Y, XU M, et al. Application practice of regional nutrient management model in Shahe river basin[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, 23(5): 98-101. (in Chinese))
- [23] 沙健. 通用流域污染负荷模型(GWLF)的改进与应用实践研究[D]. 天津: 南开大学, 2014. (SHA J. The study on general watershed load function (GWLF) model for algorithmic improvement and practical application[D]. Tianjin, Nankai University, 2014. (in Chinese))
- [24] NING S K, JENG K Y, CHANG N B. Evaluation of nonpoint sources pollution impacts by integrated 3S information technologies and GWLF modeling[J]. *Water Science and Technology*, 2002, 46(6-7): 217-224.
- [25] 张亚尼, 李泽利, 邓小文, 等. 沙河流域非点源溶解态氮负荷模拟及源解析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 352-356. (ZHANG Y N, LI Z L, DENG X W, et al. Simulation and source apportionment of nonpoint source dissolved nitrogen load in Shahe watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 352-356. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.055.
- [26] 赵越, 齐作达, 赵康平, 等. 基于GWLF模型的新安江上游练江流域面源污染特征解析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 5-9. (ZHAO Y, QI Z D, ZHAO K P, et al. Feature analysis of watershed nonpoint source pollution of Lianjiang watershed in upstream of Xin'an river based on GWLF model[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(3): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.02.
- [27] 中国气象科学数据共享服务平台[EB/OL]. <http://data.cma.cn/data/cdcindex/cid/0b9164954813c573.html>, 2018-01-13. (China Meteorological data service center[EB/OL]. <http://data.cma.cn/data/cdcindex/cid/0b9164954813c573.html>, (in Chinese))
- [28] HAITH D A, MANDEL R, WU R S. GWLF: Generalized watershed loading functions, version 2.0, user's manual[M]. Ithaca, NY: Dept. of Agricultural & Biological Engineering, Cornell University, 1992.