

丁洋, 赵进勇, 董飞, 等. 妫水河流域农业非点源污染负荷估算与分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 139-146.
 DING Yang, ZHAO Jinyong, DONG Fei, et al. Estimation and analysis of agricultural non-point source pollution load in Guishui River Watershed[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 139-146.

妫水河流域农业非点源污染负荷估算与分析

丁洋^{1,2}, 赵进勇¹, 董飞¹, 徐征和², 马冰¹, 彭文启¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
 2. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要: 本文利用改进的输出系数模型对妫水河流域农业非点源污染负荷进行了估算, 并且分别通过三分法, 即分区、分类、分期的方法对结果进行了分析。结果表明: (1) 2017年妫水河流域农业非点源污染物 TN 和 TP 的负荷量分别为 1 402 214.9 kg/a, 279 629.1 kg/a; (2) 流域内各乡镇 TN 和 TP 的负荷量差异较大, 旧县镇、永宁镇所贡献的 TN、TP 负荷量最多且单位负荷强度最大, 属于重点治理区域; (3) 流域内对 TN 的贡献最大的污染源为农业种植, 对 TP 的贡献最大的污染源为农村生活污染, 这两个污染源属于优先控制的污染源; (4) TN、TP 负荷与降雨量呈现正相关关系, 降雨冲刷是导致污染物负荷增加的一个主要因素。农业非点源污染的三分研究结果为妫水河流域非点源污染治理与农业结构调整提供了科学依据。

关键词: 农业非点源污染; 改进输出系数模型; 氮磷; 妫水河流域; 三分法

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)16-0139-08



Estimation and analysis of agricultural non-point source pollution load in Guishui River Watershed

DING Yang^{1,2}, ZHAO Jinyong¹, DONG Fei¹, XU Zhenghe², MA Bing¹, PENG Wenqi¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China)

Abstract: The agricultural non-point source pollution load in Guishui River Watershed is estimated herein with the improved export coefficient model, and then the result is analyzed with the tripartition method, i. e. the method of zoning, classifying and staging. The result shows that (1) the loads of the agricultural non-point source pollutants TN and TP in Guishui River Watershed are 1 402 214.9 kg/a and 279 629.1 kg/a respectively in 2017; (2) the differences of the loads of TN and TP among all the townships within the watershed are larger; in which the loads of TN and TP contributed by Jiuxian Town and Yongning Town

收稿日期: 2019-01-16

基金项目: 国家水体污染与治理科技重大专项(2017ZX07101004-001); 中国水科院创新领军人才项目(WE0145B532017); 中国水科院调研专项(WE0145C172018)

作者简介: 丁洋(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事流域水环境循环综合调控方向的研究。E-mail: 1099848209@qq.com

通信作者: 董飞(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事流域容量总量控制理论与方法等研究。E-mail: dongfei99999@163.com

are the most with the maximum unit load intensity ,thus the regions belong to the key control areas; (3) the pollution source with the greatest contribution to TN in the watershed is the agricultural pollution , while the pollution source with the greatest contribution to TP is the rural domestic pollution; thus both the pollution sources belong to the pollution sources necessary to be preferentially controlled; (4) TN and TP loads are positively correlated with rainfall , while the rainfall erosion is one of the major factors for the increase of pollutant load. The result from the study made with the tripartition method provides a scientific basis for the control of the agricultural non-point source pollution and the adjustment of the agricultural structure within Guishui River Watershed.

Keywords: agricultural non-point source pollution; improved export coefficient model; nitrogen and phosphorus; tripartition method; Guishui River Watershed

0 引 言

近十年来,非点源污染尤其是农业非点源污染已经逐渐成为影响水环境质量的重要因素^[1]。非点源污染因为其过于分散、不易识别和收集的特点,其严重性逐渐显现出来^[2]。我国目前正处于污染构成快速转变时期,非点源污染的负荷比重在逐步上升^[3]。近年来的研究表明,氮、磷非点源污染负荷已占接纳水体污染负荷的50%以上,并对接纳水体产生严重影响^[4]。

输出系数模型即经验模型通过一种“黑箱”的方法来对污染物输入输出进行模拟的,该模型对数据资料的要求较低,在中尺度区域研究非点源具有重要的用途^[5]。例如 Johnes 等^[6]提出的输出系数法模型。虽然 Johnes 的输出系数模型对各土地利用类型与营养物质分类计算考虑较为全面,但未考虑非点源污染产生的驱动条件——降水及影响非点源污染输移的重要因素——地形,导致该模型计算非点源污染时具有一定的局限性。因此,本文对 Johnes 的输出模型进行了改进并运用到妫水河流域中,并且在流域尺度上提出了非点源污染负荷识别与诊断的“三分”方法,即分区、分类、分期,通过“三分”方法来识别与解析流域尺度上非点源污染。

官厅水库是保障北京市防洪安全的重要水库,也是京西供水的重要水源地。妫水河是官厅水库入库的主要河流,其水质情况直接影响库区水质,根据郝芳华等^[7]对官厅水库水质的研究介绍,水库水质已经达到或超过富营养化水平,非点源污染是造成水质恶化的重要原因之一。妫水河流域地势起伏明显,高程在472~

2157 m 之间,并且降水分布不均,非点源污染受降水与地形的影响相比于其他区域影响较大,因此本文考虑降水与地形因素,使用改进输出系数模型对妫水河流域非点源污染进行估算,解析了流域中 TN、TP 污染源,并且运用“三分”方法对妫水河流域非点源污染进行拆分,为流域非点源污染负荷识别与调控提供定量化依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

妫水河流域位于北京市延庆区,是北京市西北重要的生态屏障,经纬度 115°48'51"—116°20'42"E,40°21'50"—40°38'40"N。妫水河流域南北东三面环山,西临官厅水库,海拔472~2157 m,流域四周多以山地为主地势较高,中间为延怀盆地地势低,流域面积724.6 km²。该区域属温带大陆性气候,气候冬冷夏凉,年平均气温8.5℃,多年平均降水量442 mm^[8]。妫水河流域范围如图1所示。

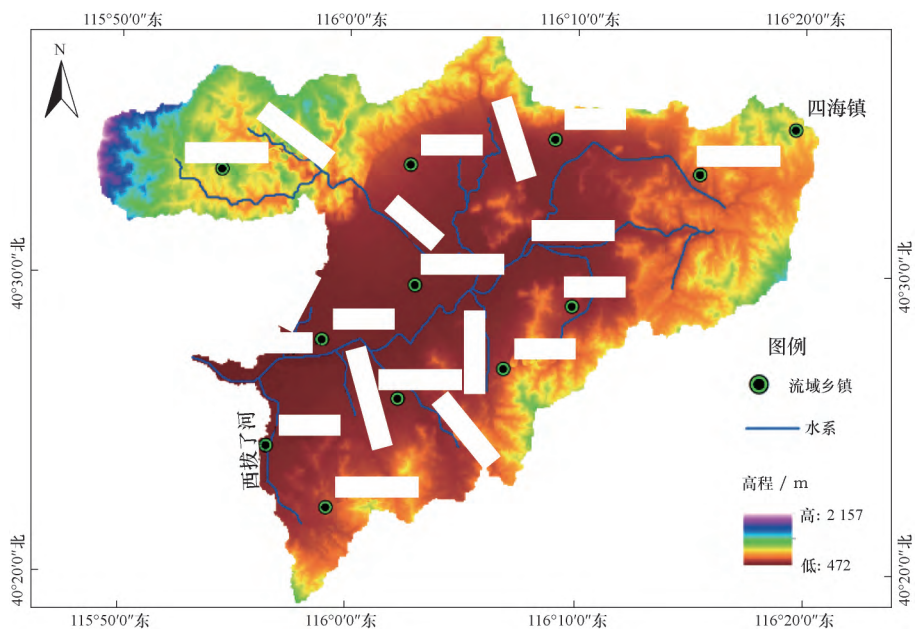


图1 妫水河流域范围

表 1 研究数据及其来源

数据类型	分辨率/比例/覆盖范围	用途	来源
DEM	30 m × 30 m	地形影响分析	地理空间数据云
气象数据	延庆(1959—2017)、康庄、永宁、张山营、香村营站逐日雨量数据(2017)	降水影响分析	延庆区水务局
土地利用	1:250 000	土地利用类型(2017)	SPOT 卫星遥感数据解译
社会经济数据	妫水河流域	农村生活、畜禽养殖污染计算分析	延庆区统计年鉴

1.2 数据来源

本研究所用的数据有 DEM、土地利用、气象数据、社会经济数据,如表 1 所列。

2 研究方法

2.1 Johnes 输出模型

Johnes 输出系数模型表达式为

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i (I_i) + P \quad (1)$$

式中, i 为流域污染源的种类; L 为流域非点源污染总负荷; E_i 为第 i 种污染源的输出系数; A_i 为第 i 种污染源的数量; I_i 为第 i 种污染源营养物输入量; P 为由降水输入的污染物数量,本次研究参考其他学者相关研究暂不考虑此项的影响^[9]。

2.2 改进的 Johnes 输出模型

本次研究将降水与坡度因素引入进 Johnes 输出系数模型中,参考以往的研究成果^[10],改进输出系数模型表达式为

$$L = \alpha\beta \sum_{i=1}^n E_i A_i (I_i) + P \quad (2)$$

式中, α 为降水影响条件下流域产污系数; β 为坡度影响因子,其他参数同式(1)。

2.2.1 模型参数的确定

(1) 基础数据的获取。妫水河流域全部位于北京市延庆区内,考虑到资料数据的限制,查阅了 2017 年北京市延庆区统计年鉴中农村人口及畜牧养殖数量,使用面积修正法得到妫水河流域内上述资料,通过妫水河流域土地利用图获取土地利用情况。本次研究将流域农业非点源污染源分为农村生活污染源、畜禽养殖污染源及农业种植污染源。具体结果如表 2 所列。

(2) 输出系数确定。输出系数的

来源一般有 3 种途径,分别为文献参考、研究实验及水文统计,由于研究区监测资料的限制,本研究使用文献参考来确定输出系数。妫水河流域地处华北平原,故本次研究输出系数的取值参考空间上邻近,气候、地形和种植种类相似的京津冀地区水库流域中文献所采用的输出系数^[11],结合妫水河流域实际情况,具体结果如表 3 所列。

2.2.2 降水影响因子 α 的确定

研究表明^[12],降水影响因子系数主要通过降水的年际分布差异 α_t 与空间分布差异 α_s 共同确定,并且流域年降水量 r 与流域营养物流失量 L 具有相关关系

$$\alpha = \alpha_t \times \alpha_s = \frac{f(r)}{f(\bar{r})} \times \frac{r_j}{\bar{r}} = \frac{L}{\bar{L}} \times \frac{r_j}{\bar{r}} \quad (3)$$

式中, \bar{r} 为流域年平均降水量; r_j 为空间单位 j 的年均降水量; L 为流域营养物流失量; \bar{L} 为多年流域营养物流失量平均值。

表 2 2017 年妫水河流域农村人口、牲畜数量及土地利用

妫水河流域	农村人口 /10 ³ 人	牲畜 /10 ³ 头				土地利用类型 /km ²			
		猪	牛	羊	家禽	耕地	林地	草地	园地
八达岭镇	2.94	3.20	0	1.00	0.80	450	2 919	131	0
大榆树镇	14.56	2.14	0.46	6.42	260.05	2 098	2 238	560	0
井庄镇	6.50	2.02	0.13	4.26	21.14	1 777	5 616	310	213
旧县镇	18.78	7.29	1.30	4.50	432.47	4 104	5 910	127	1 242
康庄镇	0.59	0.23	0.01	0.15	10.62	170	1	64	13
刘斌堡乡	3.10	0.94	0	2.08	22.33	1 413	3 381	1 531	0
沈家营镇	10.89	15.12	0.93	3.07	48.62	1 719	422	253	281
四海镇	0.14	0	0	0	0.24	25	313	0	0
香营乡	1.95	4.35	0.21	1.29	3.16	1 511	1 765	31	0
延庆镇	28.36	3.34	0.09	2.95	22.86	2 145	182	463	560
永宁镇	22.49	37.07	0.35	5.00	65.90	3 288	9 152	974	0
张山营镇	7.95	0.25	0.06	1.7	520.51	285	9 573	34	0

表 3 妫水河流域非点源污染输出系数 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} (\text{头}^{-1}) (\text{人}^{-1}) \text{a}^{-1}$

项目	耕地	草地	林地	园地	猪	牛	羊	家禽	农村人口
TN	20.2	6.4	2.5	9.01	0.74	10.21	0.4	0.028	2.14
TP	2.06	0.36	0.15	1.31	0.15	0.31	0.045	0.004	0.89

考虑到缺少流域内污染物入河监测数据,参考耿润哲等^[13]在邻近流域密云水库流域的研究成果,建立妫水河流域年降水量 r 与流域营养物流失量 L 具有相关关系

$$L_{TN} = 0.040 2r^2 - 27.81r + 5301.4, \quad R^2 = 0.863 1 \quad (4)$$

$$L_{TP} = 0.000 7r^2 - 0.453 8r + 77.939, \quad R^2 = 0.737 4 \quad (5)$$

由 1970—2017 年降水数据可以得到妫水河流域多年平均降水量为 433.4 mm,由式(3)—(5)可以得到妫水河流域的 TN 、 TP 降水影响因子的表达式为

$$\alpha_{TN} = \frac{0.040 2r^2 - 27.81r + 5301.4}{799.536} \times \frac{r_j}{\bar{r}} \quad (6)$$

$$\alpha_{TP} = \frac{0.000 7r^2 - 0.453 8r + 77.939}{12.747} \times \frac{r_j}{\bar{r}} \quad (7)$$

通过计算分析可以得出妫水河流域 2017 年 TN 降水影响因子为 1.07 ~ 2.07、 TP 降水影响因子为 1.09 ~ 3.02,其空间分布整体呈现由中部地区向四周地区递减趋势,如图 2 所示。

2.2.3 地形影响因子 β 的确定

根据研究表明^[12],地形影响因子 β 主要是通过影响径流量的大小来改变 TN 和 TP 流失量,其计算公式如下

$$\beta = \frac{L(\theta_j)}{L(\bar{\theta})} = \frac{c\theta_j^d}{c\bar{\theta}^d} = \frac{\theta_j^d}{\bar{\theta}^d} \quad (8)$$

式中, θ_j 为研究区内空间单元的坡度; $\bar{\theta}$ 为整个研究区的平均坡度; c 、 d 为常数。参考陈学凯等^[14]研究成果可得 d 为 0.610 4,根据妫水河流域 DEM 数据(见图 1)采用 ArcGis 中坡度分析功能计算出妫水河流域平均坡度为 9.376 1,由式(8)可以得出妫水河

流域地形影响因子 β 为

$$\beta = \frac{\theta_j^{0.610 4}}{9.376 1^{0.610 4}} \quad (9)$$

通过计算得到妫水河流域地形影响因子为 0 ~ 3.03,如图 3 所示。整体呈现流域坡度四周高中间低的趋势,这与流域四周多以山地为主地势较高,中间为延怀盆地地势低的现状类似。

3 结果分析

3.1 非点源污染 TN 、 TP 分区结果分析

“分区”是指通过研究流域内不同行政区、汇水区或者控制单元的污染源及其负荷,来体现其在区域上的不同。本研究根据妫水河流域内各乡镇的行政边界作为分区边界,根据本研究建立的改进输出系数模型计算 2017 年妫水河流域内各乡镇不同农业污染源类型(不同农业土地利用类型、农业生活与畜禽养殖)贡献的氮磷负荷量, TN 、 TP 在妫水河流域内各乡镇的负荷量及单位面积负荷强度如图 4 所示,具体结果如表 4、表 5 所列。

结果表明:(1)2017 年妫水河流域农业非点源污染 TN 污染负荷为 1 402 214.9 kg/a, TP 污染负荷为 279 629.1 kg/a,在妫水河流域中,旧县镇、永宁镇所贡献的 TN 、 TP 负荷最多,这是由于这两个镇几乎全部位于妫水河流域内且农业活动较为密集,从而人类活动所产生的污染负荷也随之增加。(2)旧县镇、永宁镇的负荷强度最大,旧县镇 TN 、 TP 的负荷强度分别为 31.66 kg/(hm²·a),6.14 kg/(hm²·a),永宁镇 TN 、 TP 的负荷强度分别为 20.57 kg/(hm²·a),4.47 kg/(hm²·a);康庄镇负荷强度最小, TN 、 TP 的负荷强度分别为 6.94 kg/(hm²·a),1.27 kg/(hm²·a)。旧县镇、永宁镇位于妫水河流域中上游,表明妫水河

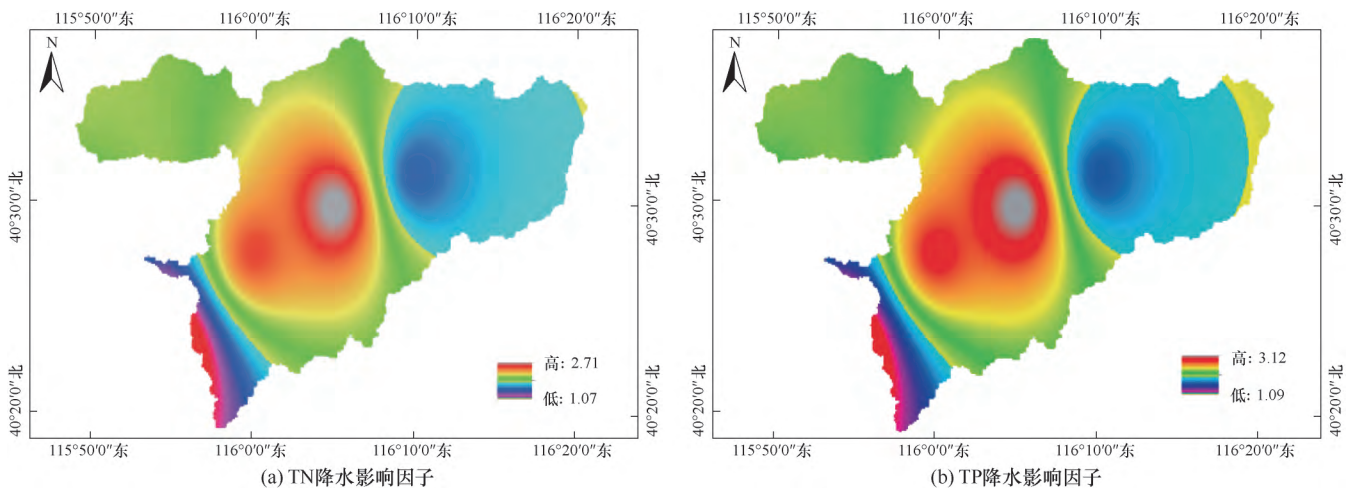


图 2 妫水河流域降水影响因子空间分布

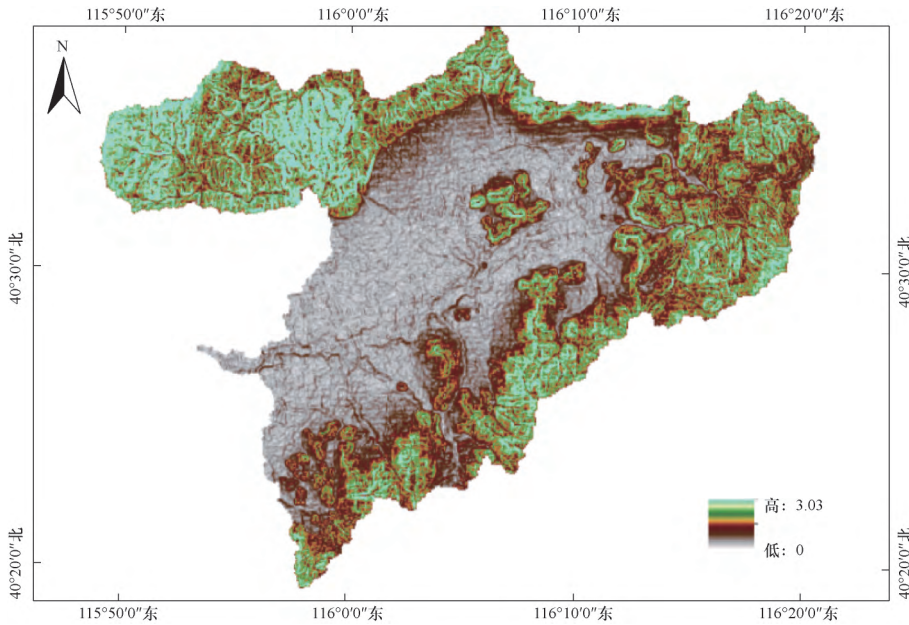


图3 妣水河流域地形影响因子空间分布

流域中上游存在着 N、P 污染的风险。

3.2 非点源污染 TN、TP 分类结果分析

“分类”是指分别研究流域内不同污染源，主要是体现各污染源占非点源污染负荷的比重。本研究将妣水河流域非点源污染源分为农村生活污染源、畜禽养殖污染源及农业种植污染源。分别计算出妣水河流域内不同污染源类型对非点源污染负荷贡献，如图5所示。结果表明，流域内不同污染源对 TN 的贡献顺序为：农业种植 > 农村生活 > 畜禽养殖，在流域内各乡镇中，除延庆镇外，农业种植污染源对 TN 的贡献率均大于农村生活与畜禽养殖污染源，延庆镇农业种植面积较小，人口密度大是农村生活污染源贡献率大于农业种植污染源的原因。农业种植中耕地对 TN 污染负荷贡献最大，这主要是因为农业化肥(氮肥为主)

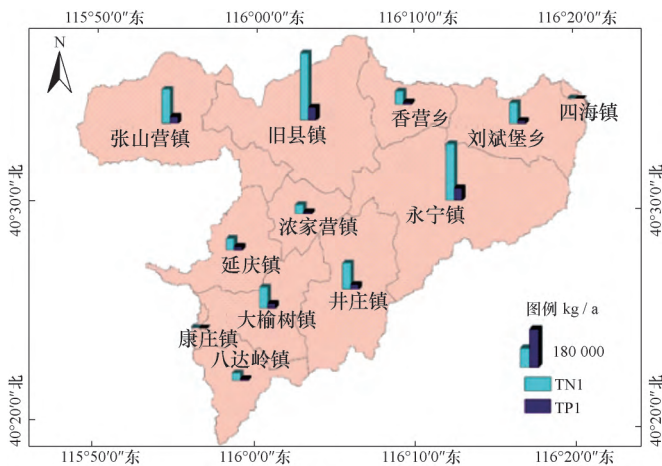
通过降雨径流过程流失，从而对流域内造成严重的污染。根据上述结果分析，妣水河流域非点源污染中 TN 主要是由于农业种植污染造成的，其中以耕地为主，因此优化农业管理措施，实施免耕、测土配方等管理措施，并且采取一些工程措施，如田间植草水道、湿地等措施可降低农业种植对 TN 负荷的影响。除此之外，农村生活污水与畜禽养殖对非点源污染造成的影响也应引起足够的重视。

流域内不同污染源对 TP 的贡献顺序为：农村生活 > 农业种植 > 畜禽养殖，除上游区域香营乡、刘斌堡乡外，流域内农村生

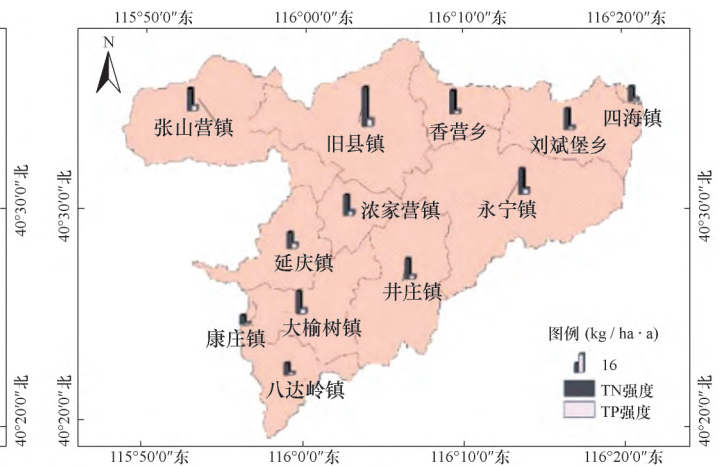
活污染源对 TP 的贡献均大于农业种植与畜禽养殖污染源，流域内香营乡、刘斌堡乡人口较少是导致农村生活污染源对 TP 贡献小的原因。农村生活对 TP 污染有较高的贡献率，原因主要有两种，一是流域内存在农村生活污水未经收集处理直排的现象，从而使得 TP 超标；二是未经处理的农村生活垃圾通过降雨径流冲刷，从而加大了 TP 的污染。

3.3 非点源污染 TN、TP 分期结果分析

“分期”是指研究不同典型水文年对降水影响因子系数 α 的变化导致流域内非点源负荷的变化。“分期”情景分析步骤为：(1) 分析研究区降雨资料，根据延庆气象站 1959—2017 年雨量数据，取频率 $f=10\%$ (594.7 mm) 的年份为典型丰水年， $f=50\%$ (445.6 mm) 的年份为典型平水年， $f=90\%$ (317.9 mm)



(a) 各乡镇污染负荷量



(b) 各乡镇污染负荷强度

图4 妣水河流域非点源污染分区结果

表4 2017年妫水流域非点源污染物TN负荷量

kg/a

妫水流域	农村生活	畜禽养殖				农业种植				合计	TN 负荷贡献率/%
		猪	牛	羊	家禽	耕地	草地	林地	园地		
八达岭镇	8 971.1	3 376.5	0	570.4	31.9	12 961.4	1 195.5	10 405.4	0	37 512.2	2.68
大榆树镇	34 491.4	1753.0	5 199.0	2 842.7	8 060.3	46 912.9	3 967.4	6193.5	0	109 420.2	7.80
井庄镇	26 339.6	2 830.5	2 513.3	3226.6	1 120.8	67 970.6	3 756.9	26 585.8	3 634.0	137 978.2	9.84
旧县镇	77 420.2	10 392.1	25 569.0	3 467.5	23 327.0	159 699.5	1 565.8	28 462.5	21 557.1	351 460.7	25.06
康庄镇	404.3	54.5	32.7	19.2	95.2	1 099.6	131.2	0.8	37.5	1 874.9	0.13
刘斌堡乡	12 889.7	1 351.5	0	1616.6	1214.8	55 457.4	19 038.0	16 422.9	0	107 990.9	7.70
沈家营镇	13 095.1	6 287.1	5 335.5	690.0	765.0	19 511.7	909.8	592.8	1 422.7	48 609.8	3.47
四海镇	739.8	0	0	0	16.6	1 247.0	0	1 932.3	0	3 935.7	0.28
香营乡	6 302.3	4 861.5	3 238.1	779.3	133.6	46 096.0	299.6	6 664.0	0	68 374.4	4.88
延庆镇	30 939.4	1 260.0	468.4	601.6	326.3	22 088.7	1510.6	232.0	2 572.2	59 999.3	4.28
永宁镇	79 934.3	45 560.1	5 935.0	3321.7	3064.6	110 309.6	10 353.1	38 000.2	0	296 478.6	21.14
张山营镇	48 246.6	524.6	1 737.3	1 928.4	41 330.7	16 326.1	617.1	67 869.3	0	178 580.0	12.74
合计	339 773.8	78 251.5	50 028.4	19 063.9	79 486.9	559 680.5	43 344.9	203 361.5	29 223.5	1 402 214.9	100
TN 负荷贡献率/%	24.231	5.581	3.568	1.36	5.669	39.914	3.091	14.503	2.084	100	

表5 2017年妫水流域非点源污染物TP负荷量

kg/a

妫水流域	农村生活	畜禽养殖				农业种植				合计	TP 负荷贡献率/%
		猪	牛	羊	家禽	耕地	草地	林地	园地		
八达岭镇	4 090.8	750.4	0	70.4	5	1 449.3	73.7	684.5	0	7 124.2	2.55
大榆树镇	16 232.2	402.1	178.6	361.9	1 303.0	5 413.8	252.5	420.5	0	24 564.7	8.78
井庄镇	12 449.7	652.1	86.7	412.6	182.0	7 877.9	240.2	1 812.9	600.5	24 314.4	8.70
旧县镇	36 541.4	2 390.7	881.1	442.7	3 781.9	18 483.0	100.0	1 938.1	3 557.1	68 115.9	24.36
康庄镇	179.1	11.8	1.1	2.3	14.5	119.4	7.9	0.1	5.8	341.9	0.12
刘斌堡乡	5 983.9	305.8	0	203.0	193.7	6313.1	1 195.4	1099.9	0	15294.8	5.47
沈家营镇	6 232.8	1 458.5	185.4	88.8	125.1	2 277.2	58.6	40.7	236.7	10 703.9	3.83
四海镇	344.3	0	0	0	2.7	142.3	0	129.7	0	619.0	0.22
香营乡	2 931.6	1 102.2	110.0	98.1	21.4	5 257.8	18.9	447.2	0	9 987.0	3.57
延庆镇	14 607.2	289.9	16.1	76.8	52.9	2 557.2	96.5	15.8	424.6	18 137.1	6.49
永宁镇	37 094.3	10 304.9	201.1	417.0	488.5	12 552.4	649.8	2 544.1	0	64 252.1	22.98
张山营镇	22 599.7	119.8	59.4	244.3	6 650.2	1 875.2	39.1	4 586.5	0	36 174.2	12.94
合计	159 287.0	17 788.1	1 719.5	2 417.9	12 820.8	64 318.7	2 732.4	13 720.1	4 824.6	279 629.1	100
TP 负荷贡献率/%	56.964	6.361	0.615	0.865	4.585	23.001	0.977	4.907	1.725	100	

的年份为典型枯水年。(2) 情景模拟: 情景1是选取枯水年降雨量317.9 mm进行模拟; 情景2选取平水年降雨量445.6 mm进行模拟; 情景3是选取丰水年降雨量594.7 mm进行模拟。(3) 整理计算结果, 分析不同典型水文年非点源污染负荷。表6为不同情景

下妫水流域各污染源负荷结果, 图6为不同情景下妫水流域非点源污染负荷结果。

从图6中可以看出, TN、TP负荷与降雨量呈现正相关关系, 且丰水年的污染负荷远大于枯水年, 说明降雨冲刷是导致的污染物负荷增加的一个主要因素, 从而在丰水年应重视非点源污染所造成的环境影响, 可选择植被缓冲带、农田植草沟、小型坑塘湿地等工程措施来削减污染物负荷^[15]。

4 结 语

通过研究可得, 2017年妫水

表6 不同情景下妫水流域各污染源负荷

kg/a

污染源	情景1(枯水年)		情景2(平水年)		情景3(丰水年)	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
农村生活污水	106 909.5	174 74.2	265 383.8	81 588.4	530 049.1	274 139.4
畜禽养殖	71 634.6	3 900.6	177 820.2	18 212.0	355 158.9	61 192.9
农业种植	265 573.6	9 439.7	659 239.5	44 074.6	1 316 694.0	148 092.2
总计	444 118.3	30 814.8	1 102 445.2	143 876.2	2 201 905.3	483 428.4

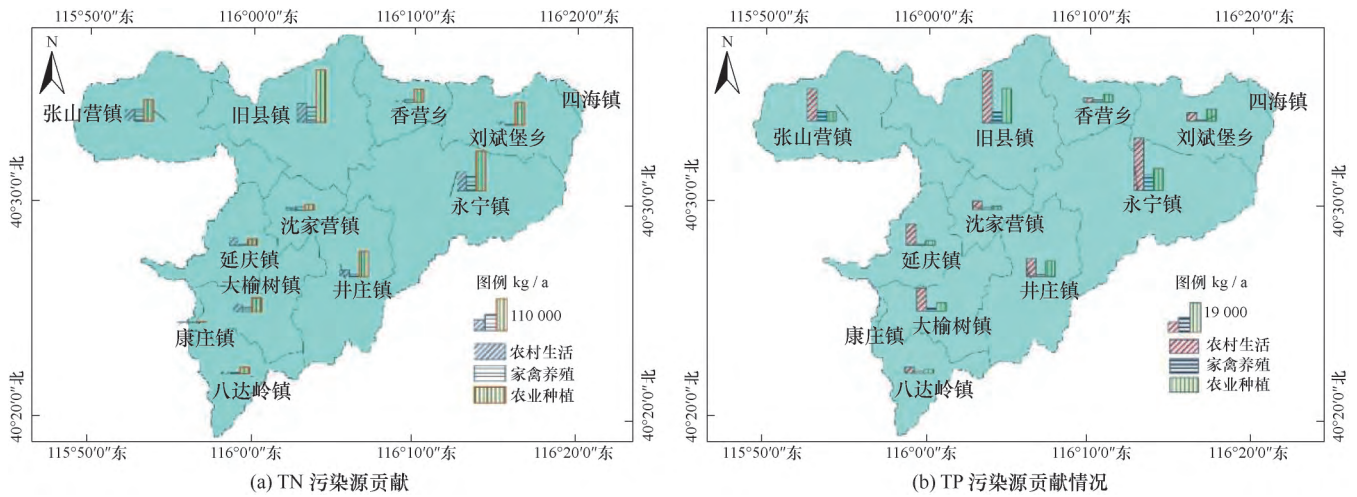


图5 妫水河流域各乡镇 TN、TP 污染源贡献示意

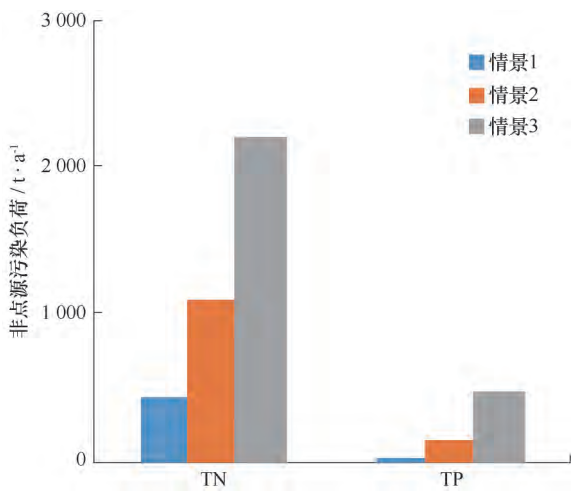


图6 不同情景下妫水河流域非点源污染负荷

河流域农业非点源污染物 TN 和 TP 的负荷量分别为 1 402 214.9 kg/a, 279 629.1 kg/a。(1) 通过“分区”结果可知,流域内各乡镇 TN 和 TP 的负荷量差异较大,旧县镇、永宁镇所贡献的 TN、TP 负荷量最多且负荷强度也最大,属于重点治理区域;而八达岭镇、四海镇与康庄镇负荷量少且负荷强度低。(2) 通过“分类”结果可知,流域内对 TN 的贡献顺序为: 农业种植 > 农村生活 > 畜禽养殖,对 TP 的贡献顺序为: 农村生活 > 农业种植 > 畜禽养殖,农业种植污染源与农村生活污染源是造成 TN、TP 污染的主要因素,属于优先控制的污染源。(3) 通过“分期”结果可知, TN、TP 负荷与降雨量呈现正相关关系,降雨冲刷是导致的污染物负荷增加的一个主要因素。

由以上分析可知,优化农业管理结构,对农村生活污水生活垃圾集中处理等管理措施可从源头控制非点源污染;建设植被缓冲带、田间植草沟和湿地等工

程措施可从污染物的迁移转化途径上削减污染物。通过“三分”研究结果,为妫水河流域采取非点源污染治理与农业结构调整提供了科学依据。

致谢: 本文研究工作得到水体污染与治理科技重大专项(2017ZX07101004-001)资助,特此表示感谢。

参考文献:

- [1] YANG O, WANG X Y. Identification of critical source areas for non-point source pollution in Miyun reservoir watershed near Beijing, China[J]. Water Science & Technology, 2008, 58(11): 2235-41.
- [2] 樊娟,刘春光,石静,等. 非点源污染研究进展及趋势分析[J]. 农业环境科学学报,2008,(4): 1306-1311.
- [3] ZHANG M, XU J. Nonpoint source pollution, environmental quality, and ecosystem health in China: introduction to the special section[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(6): 1685.
- [4] 晏维金,尹澄清,孙濮,等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报,1999(3): 57-61.
- [5] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(4): 755-761.
- [6] 丁晓雯,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境,2008(2): 306-309.
- [7] 郝芳华,孙峰,张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展[J]. 地学前缘,2002(2): 385-386.
- [8] 李琪,陈利顶,齐鑫,等. 妫水河流域农耕地非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. 环境科学,2008(1): 32-37.
- [9] DING X W, SHEN Z Y, HONG Q, et al. Development and test of the Export Coefficient Model in the Upper Reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3): 233-244.
- [10] SHEN Z, CHEN L, DING X, et al. Long-term variation (1960-2003) and causal factors of non-point-source nitrogen and phosphorus in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hazardous

Materials ,2013 ,252-253(10) : 45-56.

- [11] 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.
- [12] CHEN X, LIU X, PENG W, et al. Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Assessment and Management Plan with an Improved Method in Data-Poor Regions[J]. Water, 2017, 10(1): 17.
- [13] 耿润哲,王晓燕,焦帅,等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. 环境科学学报,2013,33(5): 1484-1492.
- [14] 陈学凯,刘晓波,彭文启,等. 程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策[J]. 环境科学,2018,39(1): 77-88.
- [15] 付意成,臧文斌,董飞,等. 基于 SWAT 模型的浑太河流域农业面源污染物产生量估算[J]. 农业工程学报,2016,32(8): 1-8.

(责任编辑 郭利娜)