灞河流域产流产污的时空特征模拟研究

赵串串，南 洋，王 雪，冯 倩，马 欢
（陕西科技大学 环境科学与工程学院，陕西 西安 710021）

摘 要：[目的] 探究灞河流域非点源污染物总氮(TN)和总磷(TP)时空演变特征及其与年径流量的负荷关系，提出污染负荷的空间分布规律，为流域规划治理提供思路。[方法] 以 1996 年和 2017 年两期土地利用数据和 2001—2017 年灞河流域降雨数据为基准，基于 GIS 技术和 AnnAGNPS 模型开展现状模拟与情景设计。[结果] ①相比 1996 年，2017 年林地和耕地的面积减少，建设用地、水域等面积增多；模拟结果显示建设用地产流定额增加，TN 负荷定额增加，TP 负荷定额增加；林地产流减少，TN 负荷减少，TP 负荷减少；水域的产流、TN 和 TP 负荷基本无变化。②2017 年建设用地 TN 污染负荷相比 1996 年(5.24 kg/hm^2)增加到 16.13 kg/hm^2，一定程度上反映了灞河流域近20 a城市非点源污染的严重性。③径流最大的区域是清峪河、灞河上游、清河以及辋川河这 4 个子流域。当径流值大于 4.00×10^8 t 时，TN 和 TP 污染物负荷处于高负荷状态。④辋川河、库峪、岱峪以及清峪这 4 个子流域的 TP，TN 负荷分布占到了灞河整个流域的 50.32%，56.09%。[结论] 目前非点源污染是灞河流域的主要污染源，尤其要重视城市非点源污染。

关键词：灞河；AnnAGNPS 模型；非点源污染；总氮；总磷
文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2021)01-0118-07 **中图分类号**：X52

文献参数：赵串串，南洋，王雪，等. 灞河流域产流产污的时空特征模拟研究[J]. 水土保持通报，2021，41(1)：118-124. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.017；Zhao Chuanchuan, Nan Yang, Wang Xue, et al. Simulation on temporal and spatial characteristics of runoff and pollution in Bahe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 118-124.

Simulation on Temporal and Spatial Characteristics of Runoff and Pollution in Bahe River Basin

Zhao Chuanchuan, Nan Yang, Wang Xue, Feng Qian, Ma Huan
(*School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) pollutants in the Bahe River basin and their load relationship with annual runoff were explored, and the spatial distribution law of pollution loads was proposed to provide guidance for watershed planning and control. [Methods] Based on the land use data for 1996 and 2017 and the rainfall data of the Bahe River basin from 2001 to 2017, the current-situation simulation and scenario design were carried out based on GIS technology and the AnnAGNPS model. [Results] ① Comparing the land-use-type data in 2017 with 1996, the areas of forest land and cultivated land type decreased and the areas of construction land and water increased. The property flow quota for construction, the TN load quota, increased, and the TP load quota increased whereas that of the forest type (TN load) and the TP load decreased. For the production flow, the TN and TP loads in the water type were basically unchanged. ② Based on land use data in 2017, the TN pollution load of construction land increased to 16.13 kg/ha compared with that (5.24 kg/ha) in 1996, which partly reflected the severity of urban non-point-source pollution in the Bahe River basin in the past 20 years. ③ The largest areas of runoff were the four sub-basin basins of Bahe River, including the Qingyu River, upper Bahe River, Qinghe River, and Wangchuan River. When the runoff value was greater than 4.00×10^8 t, the TN and TP pollutant loads were in a high load state. ④ The TP and TN load distributions in the four sub-basins, including the Wangchuan, Kuyu, Daiyu, and Qingyu rivers accounted for 50.32% and 56.09%

收稿日期：2020-08-06 **修回日期**：2020-10-10
资助项目：西安市未央区项目“基于灞河流域 CELL 单元尺度的产污模拟与管理方案研究”(203041808)
第一作者：赵串串(1976—)，女(汉族)，陕西省西安市人，硕士，副教授，研究方向为环境污染生态修复与流域水环境监测与评价。Email：sxkjdxzcc@126.com。

of the entire river basin, respectively. [Conclusion] At present, non-point-source pollution is the main source of pollution in Baba River basin, especially for urban non-point-source pollution.

Keywords: Bahe River; AnnAGNPS model; non-point-source pollution; total nitrogen; total phosphorus

灞河流域地处西安市东南,近年以来,随着经济社会的不断发展,水体的污染状况日益加重。非点源污染由于面积广,污染类型多,迁移过程复杂,成为水体污染的重要来源。污染物入河量不断增加,非点源污染问题突出。据统计[1],全球范围内有 30%～50%的地表水都受到了非点源污染的影响,欧洲国家由非点源污染排放的氮磷占地表水污染总负荷的 24%～71%[2];据 2018 年《中国水资源公报》[3]最新资料显示,对全国 2.62×10^5 km 的河流水质状况进行了评价,Ⅰ—Ⅲ类、Ⅳ—Ⅴ类、劣Ⅴ类水河长分别占评价河长的 81.6%,12.9%,5.5%,主要污染项目是氨氮、TP 和化学需氧量。统计分析陕西省环保厅 2016,2017 年水环境质量数据,TN 超标率达 70%以上,最大超标倍数达到两倍以上。因此,开展流域非点源污染的量化及其负荷的空间分布规律,具有重要意义。

模型研究一直是非点源污染研究领域中活跃分支并被广泛应用于实际。机理模型根据非点源污染形成的内在机理,通过数学模型对降雨径流以及污染物的迁移转化过程进行模拟[4],如 SWAT,HSAP,AnnAGNPS 模型等。AnnAGNPS 模型(annualized agricultural nonpoint source pollution model)是由美国农业部开发,研究而成的用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮、磷营养盐流失的连续型分布式参数模型[5]。与 GIS 紧密集成,模型参数大多可自动提取,模拟结果的显示度得以显著提高;模型对流域的径流、泥沙和化学养分进行基于实测数据或不同情景设置下的模拟,模拟研究有助于进一步掌握流域的水文变化和农业管理措施(如播种、施肥、收获、犁田等)对水文及非点源污染的响应[6]。模型应用到中国的山美水库[7]、岔口小流域[8]、西枝江流域[9]、三峡库区小江流域等[10]在内的很多流域,并取得了良好的模拟效果,说明该模型适用于国内流域的非点源模拟。赵串串等[11]基于 AnnAGNPS 模型开展灞河流域已完成现状模拟与校验,取得良好效果。

近 10 a 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[12]。为推进生态环境保护精细化管理、推进绿色发展,强化国土空间环境管控,基于三线一单政策,建立流域生态环境分区管控体系,将流域划分为不同的小子流域进行分区管理,是流域非点源污染研究的有效手段。本文运用 AnnAGNPS 模型,结合 GIS 技术,综合考虑流域内土地利用方式及类型、农业生活和降水等方面的因素,研究流域非点源污染时空变化特征分析,以期为流域规划治理提供思路。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

灞河,黄河支流渭河的支流,古名滋水,全长 109 km,流域面积 2 581 km^2。发源于秦岭北坡蓝田县灞源镇麻家坡以北。灞河流域的地理坐标:东经 108°57′—109°47′,北纬 33°50′—34°29′,位于西安市的东南方向。北主要流经区域为蓝田县、灞桥区、未央区,下游与浐河交汇,并在高陵县汇入了渭河。流域内有罗李村和马渡王两个水文监测站。

1.2　数据的来源及方法

AnnAGNPS 模型主要参数数据和来源见表 1。利用 ArcView 3.3 软件对 DEM 图层进行预处理,提取水系同时划分子流域[13]。设置不同临界源面积(CSA)和最小初始沟道长度(MSCL)的取值,划分出流域分室(Cell)和沟道(Reach)数。通过 ENVI 软件,基于灞河全流域 Landsat 5(1996 年)和 Landsat 8(2017 年)影像,构建光谱＋纹理＋NDVI 多元数据组合。应用 cart 决策树算法提取土地利用分布图,kappa 系数分类精度为 0.967 3。

子流域的划分是模型模拟的第一步,对模拟结果有重要影响。利用 ArcGIS 10.2 水文分析功能,对研究区 DEM 数据进行洼地填充、流向计算汇流、累积量计算及河网提取等处理,根据水系河网分布将灞河流域划分为 14 个小子流域(见图 1)。

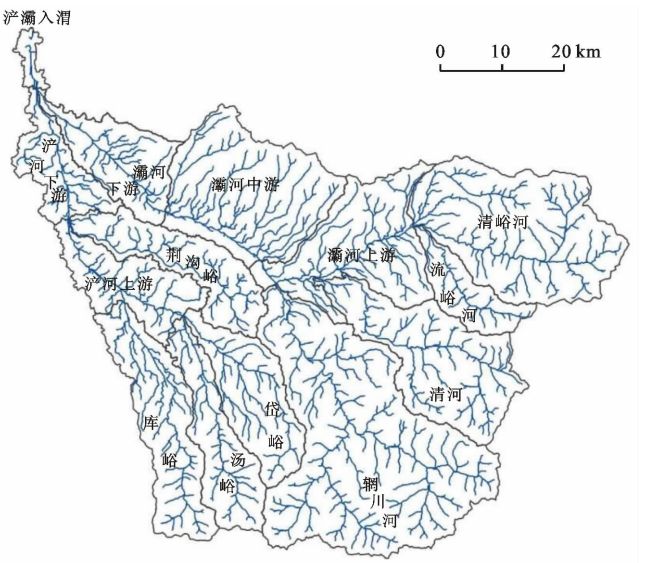


图 1　灞河子流域分布

表 1 模型所需的空间数据及属性数据

数据类型		数据描述	数据来源
空间数据	数字高程模型	DEM(2017 年 30 m 分辨率)	地理空间数据云
	土壤类型图	土壤类型,分布情况及面积等	陕西省森林资源调查
	土地利用图	Landsat 5(1996 年 30 m 分辨率)和 Landsat 8(2017 年 30 m 分辨率)	地理空间数据云
属性数据	土壤数据	土壤容重、田间持水量、饱和导水率、土壤有机质含量等	现场调研采样,试验分析
	作物数据	根系生物量冠层覆盖度、作物产量、生长和收获氮磷比等	土地利用图,资料调查等
	肥料数据	施肥量、施肥深度、肥料中氮磷含量等	资料调查及相关文献查阅等
	分室数据	分室面积、平均高程、坡长、坡度、坡向等	数字高程模型
	沟道数据	沟道长度、沟道曼宁系数、沟谷宽度等	数字高程模型
	气象数据	日最低和最高气温、降雨量、风速、云量等	西安市气象局
	管理数据	耕作操作深度、管理事件日期、管理措施等	资料调查及相关文献查阅等
	水质数据	TN,TP 等	现场采样,试验分析

2 结果与分析

2.1 模型最小单元划分对产流产污负荷的影响

在 AnnAGNPS 模型的应用中,域的离散程度高低与临界源面积(CSA)和最小初始沟道长度(MSCL)有直接相关性[14]。课题组前期以马渡王和罗李村水文站为出口,基于水文站 10 a 日径流监测数据,完成 AnnAGNPS 模型的年尺度和日尺度产流模拟校准与验证[15]。为深入探讨模型对灞河流域模拟精度问题,在模型允许的 3 000 个 cell 单元内,CSA 的取值应尽可能较小,合适的取值确保了模型的模拟精度。CSA 和 MSCL 取值要根据研究区水文特性、土地利用属性等选取合理有效的数值[16],结合流域地形特征,以丰水年(2011 年)为例,设定 CSA 和 MSCL 取值,模拟产流和产污负荷定额,确定最佳取值参数。模拟结果统计见表 2。

表 2 临界源面积(CSA)和最小初始沟道长度(MSCL)不同取值对径流及产污负荷的影响

CSA/hm^2		120	150	200	300	400	500	600	700	1000
MSCL/m		120	150	200	300	400	500	600	700	1000
分室数量		2687	2188	1637	1122	873	643	538	423	293
径流/(t·hm^{-2})	耕 地	152.43	152.69	152.42	149.53	146.88	148.44	148.15	148.68	146.05
	灌木林	160.57	157.16	157.80	154.46	150.93	167.27	172.70	167.14	147.59
	建设用地	231.89	231.77	230.46	232.58	232.50	230.94	232.03	230.64	230.38
	乔木林	120.14	119.47	120.25	119.84	119.44	120.27	123.95	119.41	116.45
	水 域	872.27	872.53	872.45	872.31	872.68	872.70	872.72	872.80	—
	未成林	198.42	193.74	196.17	210.37	198.75	221.97	181.58	194.66	195.36
	未利用地	242.32	242.32	242.35	—	—	—	—	—	—
TN/(kg·hm^{-2})	耕 地	39.06	37.45	39.31	38.02	39.03	37.67	36.24	35.47	36.76
	灌木林	15.07	14.42	14.68	13.62	13.08	14.74	15.53	14.74	11.62
	建设用地	24.49	24.39	24.09	24.85	24.85	24.49	24.56	24.24	23.76
	乔木林	8.68	8.61	8.67	8.60	8.65	8.68	9.10	8.41	8.18
	水 域	110.73	109.29	108.56	112.04	104.21	101.55	97.17	102.78	—
	未成林	23.69	23.00	24.30	24.21	23.45	26.24	20.30	23.07	26.49
	未利用地	21.80	21.79	21.80	—	—	—	—	—	—
TP/(kg·hm^{-2})	耕 地	12.58	12.16	12.81	12.51	12.69	12.42	11.92	11.83	12.04
	灌木林	2.86	2.67	2.79	2.53	2.48	2.76	2.89	2.84	2.14
	建设用地	3.69	3.62	3.63	3.91	4.04	4.02	4.00	4.08	3.99
	乔木林	1.27	1.27	1.28	1.29	1.33	1.32	1.38	1.26	1.25
	水 域	22.12	20.73	20.35	22.12	19.42	18.57	17.72	17.68	—
	未成林	4.49	4.202	4.68	4.34	4.54	4.83	3.78	4.49	5.43
	未利用地	2.36	2.315	2.35	—	—	—	—	—	—

由表 2 可知,水域的单位面积产流最高,且 CSA 的改变对其影响不大,其他地类单位面积产流随 CSA 的增大而减小,灌木林地变化幅度最大为 12.98 t/hm^2。耕地单位面积 TN 负荷随 CSA 的增大减少 2.3 kg/hm^2,灌木林地单位面积 TN 负荷减少 3.45 kg/hm^2,建设用地单位面积 TN 负荷减少 0.73 kg/hm^2。CSA 的变化对各地类单位面积 TP 负荷的影响不大。水域的单位面积 TP 负荷最高,其次是耕地,耕地单位面积 TP 负荷在 12 kg/hm^2 左右。乔木林地单位面积 TN 和 TP 负荷最小,其根系生长比较发达,对水源涵养贡献较大,因此氮磷流失小。CSA 和 MSCL 的取值决定了流域的离散化与概化程度,各地类对单位面积产流和产污的影响不同。依据数据变化趋势,本文设定 CSA 取值为 400 hm^2,MSCL 取值设置为 400 m,划分流域 cell 单元分室为 873 个。

2008 年 Shamshad 等[17] 在马来西亚的 Kuala Tasik 流域利用 AnnAGNPS 模型模巧计算流域内的非点源输出负荷,探讨其适应性,模拟结果表明氮素模拟输出结果与实测数据决定系数较好且误差较小,适用于本地区污染负荷输出模拟。根据 2017 年 DEM 图用 AnnAGNPS 模拟整个灞河流域的径流量和 TN 和 TP 负荷量,模拟结果同李家科[18] 利用 AnnANGPS模型研究的渭河流域模拟结果具有一致性,除水域外耕地污染负荷最大,林地最小。

2.2　非点源污染年际时间动态变化分析

以灞河流域 1996 年和 2017 年遥感影像作为基础资料,利用 ENVI 软件划分相应年份的地类分布,基于 GIS 软件统计分析地类分布信息结果见图 2。从图 2 可知:2017 年地类和 1996 年地类相比耕地减少,建设用地增多,水域面积也有明显增多。由表3 可知,相比 1996 年,2017 年乔木林地和耕地的面积减少了4.52%和 8.57%,同时,灌木林地面积增加了 1.90%,建设用地增加了 8.78%,水域面积增加了 2.41%。

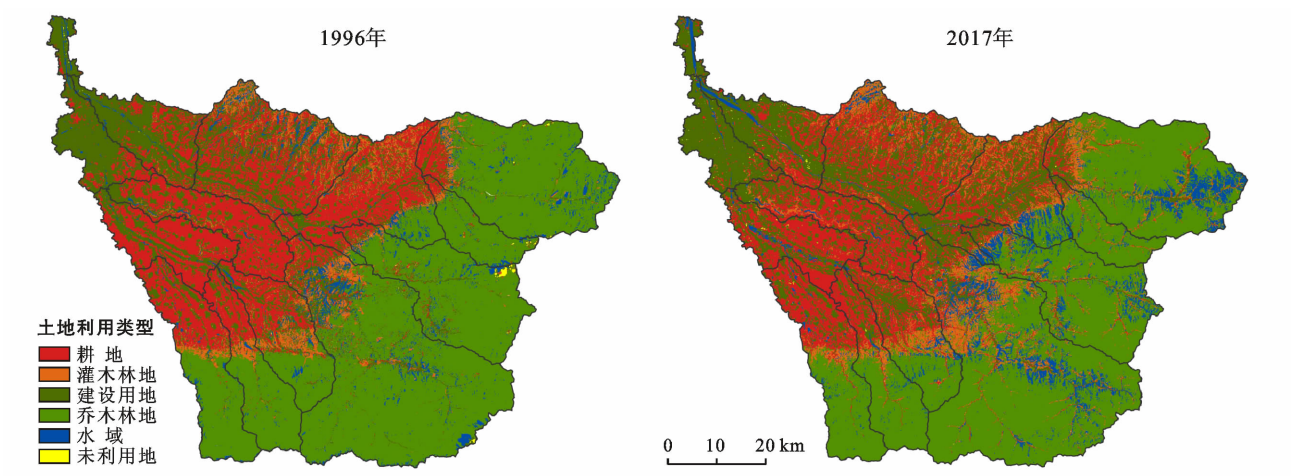


图 2　灞河流域土地利用类型分布特征

表 3　灞河流域 1996 年和 2017 年地类的面积变化

土地利用类型	面积/10^4 hm^2		净变化量/10^4 hm^2	占总面积比例/%		变化率/%
	1996 年	2017 年		1997 年	2017 年	
耕 地	7.74	5.65	−2.09	30.98	22.41	−8.57
灌木林地	0.21	0.69	0.48	0.84	2.74	1.90
建设用地	3.88	6.13	2.25	15.53	24.32	8.78
乔木林地	12.98	11.96	−1.02	51.96	47.44	−4.52
水 域	0.17	0.78	0.61	0.68	3.09	2.41

以灞河流域 2001—2017 年监测的降雨量作为基础资料,基于 AnnAGNPS 模型,模拟分析灞河流域各地类目标年份产流和产污负荷定额数据(见表 4)。由表 4 可知,2017 年相比 1996 年:耕地径流量定额增加了 9.73 t/hm^2,TN 负荷定额增加了 1.61 kg/hm^2,TP 负荷定额增加了 1.55 kg/hm^2;灌木林径流量定额增加了 21.51 t/hm^2,TN 负荷定额增加了 8.54 kg/hm^2,TP 负荷定额增加了 1.91 kg/hm^2;建设用地径流量定额增加了 10.11 t/hm^2,TN 负荷定额增加了 10.89 kg/hm^2,TP 负荷定额减少了 0.93 kg/hm^2;

乔木林径流量定额减少了 3.03 t/hm^2，TN 负荷定额减少了 0.85 kg/hm^2，TP 负荷定额减少了 0.27 kg/hm^2；水域的径流量定额、TN 负荷定额、TP 负荷定额基本无变化。

由表 3 和表 4 数据可知，耕地面积占比减少 8.57%，建设用地面积占比增加了 8.78%，引发各地类地表径流增加，导致各地类污染负荷不同程度变化，其中，建设用地 TN 污染负荷定额增加到 16.13 kg/hm^2，一定程度上反应了灞河流域近 20 a 城市非点源污染的严重性。

表 4 灞河流域各地类目标年产流和产污负荷定额模拟数据

土地利用类型	产流量/(t·hm^{-2})		TN/(kg·hm^{-2})		TP/(kg·hm^{-2})	
	1996 年	2017 年	1996 年	2017 年	1996 年	2017 年
耕 地	102.83	112.56	30.95	32.56	15.3	16.85
灌木林地	124.34	145.85	7.09	15.63	4.14	6.05
建设用地	170.84	180.95	5.24	16.13	5.16	8.25
乔木林地	101.7	98.67	3.08	2.23	1.73	1.46
水 域	707.42	708.49	64.54	66.78	20.87	22.56

2.3 非点源污染年际空间分布特征

基于 2017 年地类数据空间 cell 单元划分，对研究目标年(2001—2017)TN 和 TP 输出负荷与年径流量开展模拟分析，结合流域地类(见图 2)、得到灞河流域分区、TN 负荷模拟结果、TP 负荷模拟结果和年均径流量统计结果见图 3。整体而言，灞河流域非点源 TN 和 TP 污染负荷强度空间分布地区不均衡，差异比较明显。

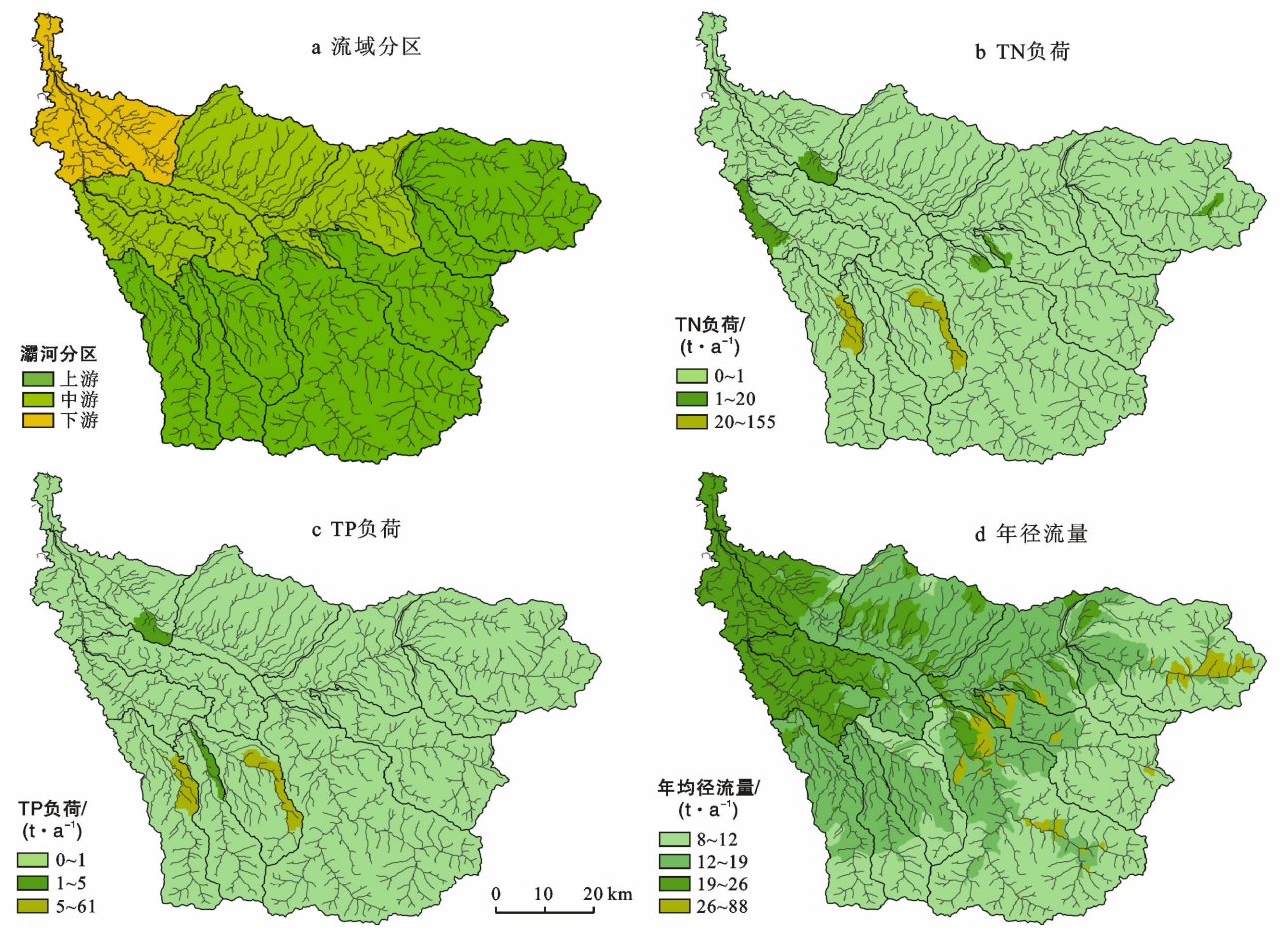


图 3 灞河流域分区、TN 年均负荷、TP 年均负荷和年均径流量的空间分布

(1) 径流情况。①灞河上游单位面积径流量小于下游单位面积径流量定额。分析原因上游的土地利用类型大多为林地，建设用地仅占上游流域面积的 11.9%，径流量小；下游建设用地占下游流域面积

86.8%。且上游土壤属于棕壤土,降雨易下渗,导致上游径流量整体小于下游地区;②径流最大的区域有清峪河、灞河上游、清河以及辋川河这 4 个子流域,这几个区域大多是水域和灌木林地,灌木林地是林地和建设用地以及耕地的过渡带地区。

(2) 污染贡献。①TN 负荷大于 20 t/a 的地区分布在库峪、岱峪,这两个子流域的 TN 负荷占比为 19.30%;TP 的负荷大于 5 t/a 的地区也分布在库峪和岱峪,这两个子流域的 TP 负荷占比为 28.17%;②TN负荷比较严重的地区占总流域面积的19.33%,TP 分布比较严重的地区占总流域面积的 15.04%;③辋川河、库峪、岱峪以及清峪这 4 个子流域的 TP 负荷占到了灞河整个流域 TP 负荷的50.32%,TN 负荷占到了灞河整个流域 TN 负荷的 56.09%,说明这 4 个子流域地区属于污染负荷严重的区域。可以看出污染负荷严重区域的地类是耕地,是因为近年来耕地施肥量大导致污染负荷高。

2.4　污染负荷与径流量的响应

在 2017 年地类基础上对流域 2001—2017 年 TN 和 TP 输出负荷与径流量关系进行相关分析。灞河流域 2001—2017 年 TN,TP 输出强度与径流量关系如图 4 所示,径流作为营养物输出的驱动因子,氮磷营养物输出负荷均与降水呈正相关关系。从径流大小来看:①当径流值小于 4.00×10^8 t 时,可以看出河流的 TN,TP 污染负荷偏低,这时应该密切关注流域背景值,为模型的数据库增加更多的背景数据;②当径流值大于 4.00×10^8 t 时,有足够多的径流将地表污染物负荷冲进水体,导致 TN 和 TP 污染物负荷处于高负荷状态,造成水体富营养化。在特别年份,水体内有大量鱼类死亡现象。

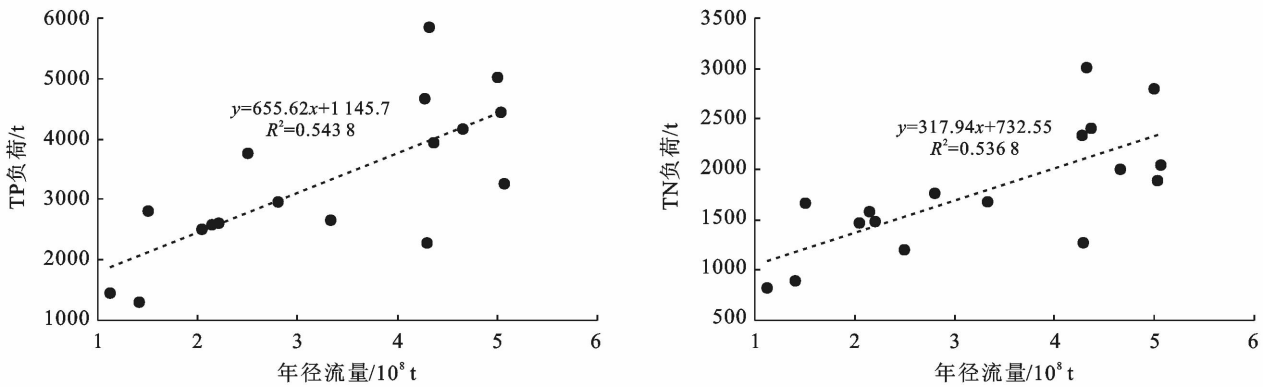


图 4　2001—2017 年 TN,TP 输出负荷和径流量的关系

3　结 论

(1) 与 1996 年相比,灞河流域 2017 年林地和耕地的面积减少,灌木林地、建设用地、水域等面积增多;水域地类径流量、TN 负荷、TP 负荷基本无变化;耕地面积减少,但是由于过度施肥,污染情况依然严峻;其他地类随着径流的变大(变小),污染负荷也随之变大(变小)。

(2) 与 1996 年相比,灞河流域 2017 年耕地面积占比减少了 8.57%,建设用地面积占比增加了 8.78%。由此引发流域地表径流增加,导致其污染负荷不同程度变化。其中,基于 2017 年地类数据,建设用地 TN 污染负荷相比 1996 年(5.24 kg/hm^2)增加到 16.13 kg/hm^2,一定程度上反应了灞河流域近 20 a 城市非点源污染的严重性。

(3) 从污染负荷情况来看:灞河流域非点源 TN,TP 污染负荷强度地区分布不均衡;辋川河、库峪、岱峪以及清峪 4 个子流域污染严重,TP 负荷占到了灞河整个流域的 50.32%,TN 负荷占到了灞河整个流域的 56.09%;基于近 20 a 模拟结果与分析,统计流域各个土地类型产流产污定额变化,除水域外,耕地产流产污定额最大,林地产流产污定额最小。

(4) 从径流情况来看,径流最大的区域有清峪河、灞河上游、清河以及辋川河子流域,这 4 个子流域水域和灌木林地面积占比较大。当灞河流域径流值小于 4.00×10^8 t时,应该密切关注流域污染负荷背景值;当径流值大于 4.00×10^8 t 时,TN 和 TP 污染物负荷处于高负荷状态,流域应该做好污染防治工作。

[参 考 文 献]

[1] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,等.农业面源污染的形式与现状与防治进展[J].中国人口·资源与环境,2010,20(4):81-84.

[2] 杨云碧,杨彩花.我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J].资源节约与环保,2019(4):102.

[3] 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.

[4] Yuan Y, Bingmer R L, Reibich R A. Evluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA watersheds [J]. Transactions of the Asae, 2001,45(5):1183-1190.

[5] Sarangi A, Cox C A, Madramooto C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St. Lucia watersheds[J]. Biosystems Engineering, 2007,97(2):241-256.

[6] 董亮. GIS 支持下西湖流域水环境非点源污染研究[D]. 浙江 杭州:浙江大学,2001.

[7] 卢彬彬,陈莹,陈兴伟,等. 基于 AnnAGNPS 模型的山美水库流域非点源氮控制研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2019,14(1):54-61.

[8] 娄永才,郭青霞. 岔口小流域 AnnAGNPS 模型参数敏感性分析[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(3):207-215.

[9] 徐恺,苏华,杨静学,等. 基于多源数据 AnnAGNPS 西枝江流域的污染模拟研究[J]. 农业环境与发展,2012,29(1):52-57.

[10] 高银超,鲍玉海,唐强,等. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域非点源污染负荷评价[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(S1):119-126.

[11] 赵串串,冯倩,侯文涛,等. 基于 AnnAGNPS 模型的灞河流域非点源污染模拟研究[J]. 环境污染与防治,2019,41(3):317-322.

[12] 李硕,刘磊. AnnAGNPS 模型在潋水河流域产水、产沙的模拟评价[J]. 环境科学,2010,31(1):49-57.

[13] 朱良峰,吴信才,刘修国. GIS 中矢量多边形网格化问题研究[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(1):12-15.

[14] 熊立华,郭生练. 基于 DEM 的数字河网生成方法的探讨[J]. 长江科学学院院报,2003,20(4):14-17.

[15] 赵串串,高瑞梅,章青青. 基于 AnnAGNPS 模型的罗李村子流域水文模拟与评价[J]. 水土保持研究,2017,24(2):137-141.

[16] 王晓燕,林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 AnnAGNPS模型模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(S1): 46-52.

[17] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008,10(3):239-252.

[18] 李家科. 流域非点源污染负荷定量化研究[D]. 陕西 西安:西安理工大学,2009.

(上接第 117 页)

[5] Kouchami-Sardoo I, Shirani H, Esfandiarpour-Boroujeni I, et al. Application of a Bayesian belief network model for assessing the risk of wind erosion:A test with data from wind tunnel experiments [J]. Aeolian Research, 2019, 41:100543.

[6] Feizi Z, Ayoubi S, Mosaddeghi M R, et al. A wind tunnel experiment to investigate the effect of polyvinyl acetate, biochar, and bentonite on wind erosion control [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019,65(8):1049-1062.

[7] 梁会,田美荣,钱金平,等. 基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J]. 水土保持研究,2019,26(1):34-40.

[8] 袁利,张春强,张芷温,等. 淮河流域黄泛平原风沙区水土流失格局[J]. 中国水土保持,2019(12):10-13.

[9] 王旭洋,郭中领,常春平,等. 中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布[J]. 中国沙漠,2020,40(1):12-22.

[10] 徐涛,蒙仲举,党晓宏,等. 乌兰布和沙漠绿洲农田不同土地利用方式地表风蚀特征研究[J]. 土壤,2018,50(3):606-612.

[11] 康玉梅,常春平,王仁德,等. 北方农牧交错带缓坡耕地土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报,2012,26(5):55-58.

[12] 朱震达. 湿润及半湿润地带的土地风沙化问题[J]. 中国沙漠,1986,6(4):5-16,2.

[13] 李福兴. 黄淮海平原砂地土壤的基本特性及其改造利用的初步研究:以山东省夏津县黄河故道区为例[J]. 中国沙漠,1989,9(1):50-63.

[14] 李孝永,匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响[J]. 生态学报,2020,40(16):5525-5533.

[15] 李茂娟,李天奇,朱连奇,等. 50 年来东北黑土区土地利用变化对沟蚀的影响:以克东地区为例[J]. 地理研究,2019,38(12):2913-2926.

[16] 黄凯旋,刘扬,董晓健,等. 基于土地利用变化的三峡库区(湖北段)土壤侵蚀消长研究[J]. 水土保持研究,2020,27(1):1-6,20.

[17] 宋胜明,刘霞,张荣华,等. 黄泛风沙区耕地土壤风蚀影响因子的通径分析[J]. 水土保持通报,2017,37(3):249-253.

[18] 皮泓漪,张萌雪,夏建新. 黄土高原退耕区土地利用变化及土壤侵蚀分析:以宁夏泾源县为例[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(3):522-534.

[19] 刘金巍,靳甜甜,刘国华,等. 黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能[J]. 生态学报,2014,34(23):7013-7025.

[20] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准:SL 190-2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[21] 张乐. 鲁西北黄泛区土壤侵蚀研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.