

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.014

基于 STELLA 和输出系数法的流域非点源负荷 预测及污染控制措施

程 静,贾天下,欧阳威

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

摘要:以汾河流域为研究对象,综合考虑非点源污染与农村生活、社会经济、土地利用之间的因果关系,利用输出系数法和系统动力学理论建立流域非点源污染的 STELLA 模型,对汾河流域非点源污染 TN 负荷进行估算,并提出缓解方案。结果表明,2014 年汾河流非点源污染 TN 负荷为 $8.961 \times 10^4 \text{t}$,农村生活污染贡献最大;当前发展模式无法实现 TN 负荷的有效控制,至 2030 年将增长 6.83%;强化农村水废处理和改善土地利用方式对 TN 负荷有明显的削减效果,且综合型发展方案比单一倾向性措施更具现实意义。

关键词:非点源污染;STELLA 模型;输出系数法;系统动力学理论;TN 负荷;汾河流域
中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)03-0074-08

Prediction of non-point source load based on STELLA and export coefficient method and prevention measures

CHENG Jing, JIA Tianxia, OUYANG Wei

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on comprehensive analysis of the complex causalities between non-point source pollution and rural livelihoods, social economy, and land use, a STELLA model was built with the export coefficient method and system dynamics theory to simulate and predict the total nitrogen (TN) load from non-point sources in the Fenhe River Basin. The results show that the TN load of the study area was $8.961 \times 10^4 \text{t}$ in 2014, which was mostly attributed to activities related to local rural livelihoods. The current development mode cannot effectively control the pollution and the TN load will increase by 6.83% by 2030. Reinforcing wastewater treatment and encouraging land use types less conducive to non-point source pollution will greatly reduce the TN load, and the comprehensive development solutions are more practical than the simple and biased measures.

Key words: non-point source pollution; STELLA model; export coefficient method; system dynamics; total nitrogen load; Fenhe River Basin

近年来汾河流域点源污染状况明显改善^[1-2],但不合理的土地利用^[3]及粗放型的农业生产方式^[4]导致非点源污染日益加剧,以 TN 的过量排放为重要特征之一。相较于点源污染,非点源污染具有显著的分散性、潜伏性、隐蔽性、随机性等特征,防治困难^[5-6],且无法改变影响非点源污染的气候、地形、土壤结构等自然因素^[7]。因此,从可控人类活动的角

度科学估算、合理预测区域非点源污染负荷,并针对性地提出缓解方案,对有效防控区域非点源污染具有重要意义。

运用模型进行时空模拟是非点源污染量化研究的重要手段^[8]。现有的 SWAT、HSP、GBNP 等分布式模型对资料要求高,参数众多且率定困难,难以用于汾河流域等大尺度区域的污染负荷估算^[9-10]。

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD15B05)

作者简介:程静(1994—),女,本科生,水资源规划与管理专业。E-mail: 503450053@qq.com

通信作者:欧阳威,副教授。E-mail: wei@bnu.edu.cn

Johnes 等^[11]提出的输出系数法在综合考虑污染物侵蚀、迁移、转化的基础上,利用土地利用状况等资料即可估算流域污染物输出量。该方法对缺乏长期水量、水质数据的汾河流域的非点源污染负荷估算有显著优势^[12-13]。

非点源污染是一个多变量巨系统,既受区域自然地理条件影响,更与人类社会经济活动高度相关^[14],各变量间相互影响,关系复杂。单纯的输出系数法缺乏对人类活动影响、各影响因子间的反馈及污染物动态时变特征的考虑,而系统动力学方法以反馈控制理论为基础^[15],从系统性、动态性角度建立模型,以因果逻辑关系连接变量^[16],善于模拟分析非线性、多变量、多重反馈和复杂时变等问题^[17],可有效弥补输出系数法的不足。

笔者以汾河流域为研究对象,以输出系数法为基础,综合考虑非点源污染与农村生活、社会经济、土地利用之间的因果关系,利用系统动力学理论建立流域非点源污染的 STELLA 模型,对汾河流域非点源污染 TN 负荷进行估算,分析可控人类活动影响下流域非点源污染 TN 负荷的变化趋势,并结合模型的敏感度分析结果,设计、模拟减缓流域非点源污染的应对方案,以期为汾河流域非点源污染的防治和进一步研究提供参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河第二大支流、山西省内最大河流,流经忻州、太原、晋中、吕梁、临汾、运城 6 市。汾河流域地处山西省的中部和西南部,东西宽 188 km,南北长 412 km,总面积占全省的 25.3%,在山西省的经济社会发展中占有重要地位。汾河流域水系图和行政区划图分别见图 1~2。

汾河流域地处中纬度大陆性季风带,属温带大陆性季风气候,光热资源丰富,农业和畜牧业发展较早,农村生活污水及禽畜粪便排放量大,加之长期不合理的土地利用,导致汾河流域的水土流失和非点源污染问题严重。

1.2 输出系数法

输出系数法将非点源污染源分为城镇用地、农村生活、农田、人口、牲畜等几大类,根据土地利用类型的差异、居民非点源污染物的排放和处理状况、牲畜的数量和分布,对不同的土地利用和不同牲畜采用不同的输出系数^[11,18]。该方法流域的总负荷量计算公式为

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + P \quad (1)$$

式中: L_j 为污染物 j 在该流域的总负荷量; m 为流域

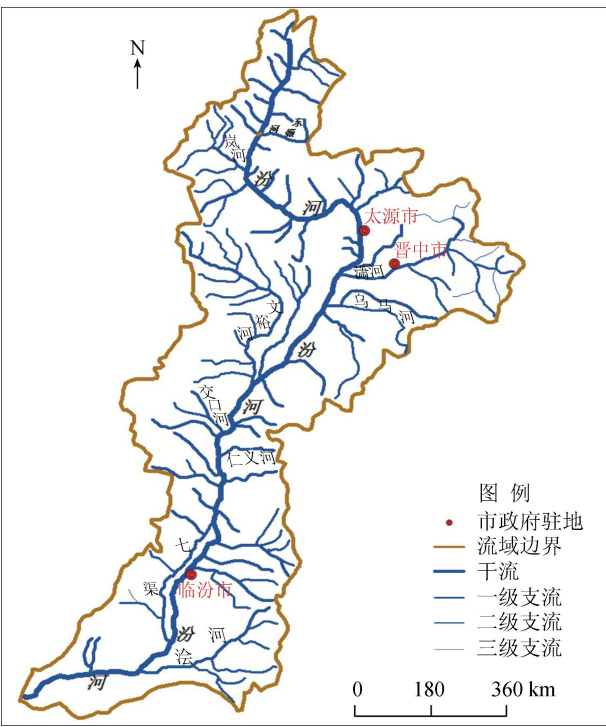


图 1 汾河流域水系

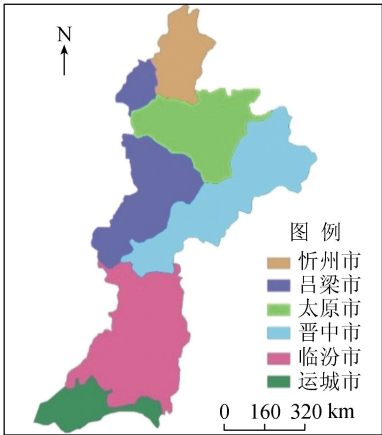


图 2 流域行政区划

中土地利用类型的种类或牲畜、人口数量; E_{ij} 为污染物 j 在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数或牲畜、人口的输出系数; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积或牲畜、人口数量; P 为由降雨输入的营养物数量。

合理确定输出系数的取值是准确估算非点源污染负荷的关键。参照国内外的相关研究成果^[19-22],笔者确定汾河流域非点源污染 TN 负荷的输出系数见表 1。

1.3 非点源污染系统动力学模型

1.3.1 模型结构分析

构建系统动力学模型的关键在于分析系统内部各要素的因果关系和反馈回路^[23]。基于汾河流域非点源污染与当地社会、经济、人口的关系,从人为可控的影响因素出发,将非点源污染 TN 负荷来源分为土地利用、畜禽养殖和农村居民生活 3 部分,建立模型的因果关系回路图见图 3。

表 1 汾河流域非点源污染 TN 负荷输出系数		
类型	输出系数	来源及说明
土地利用	耕地	17.43 根据流域内氮肥施用量、主要作物面积及氮素损失率确定 ^[19]
	林地	3.27 类比陕西省水源区林地 TN 的输移状况 ^[20]
	草地	1.58 选用王少璇等 ^[21] 根据 TN 输出量和监测浓度确定的输出系数
	建设用地	11.00 根据蔡明等 ^[18] 的研究成果与汾河流域具体情况确定
	未利用地	8.56 根据汾河流域的土壤含氮量和土壤侵蚀模数确定
畜禽养殖	大牲畜	8.01
	猪	0.74 根据各类牲畜排泄物中的氮含量和氮的输出比例确定 ^[22]
	羊	0.80
	家禽	0.04
农村生活	农村人口	2.01 根据蔡明等 ^[18] 、Johnes 等 ^[22] 的研究成果确定

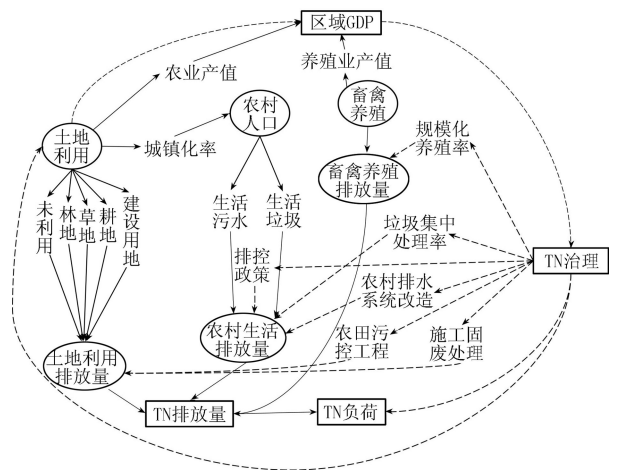


图 3 汾河流域 TN 负荷系统动力学模型因果关系

1.3.2 模型建立及参数率定

模型的空间界限为汾河流域的自然地理边界，

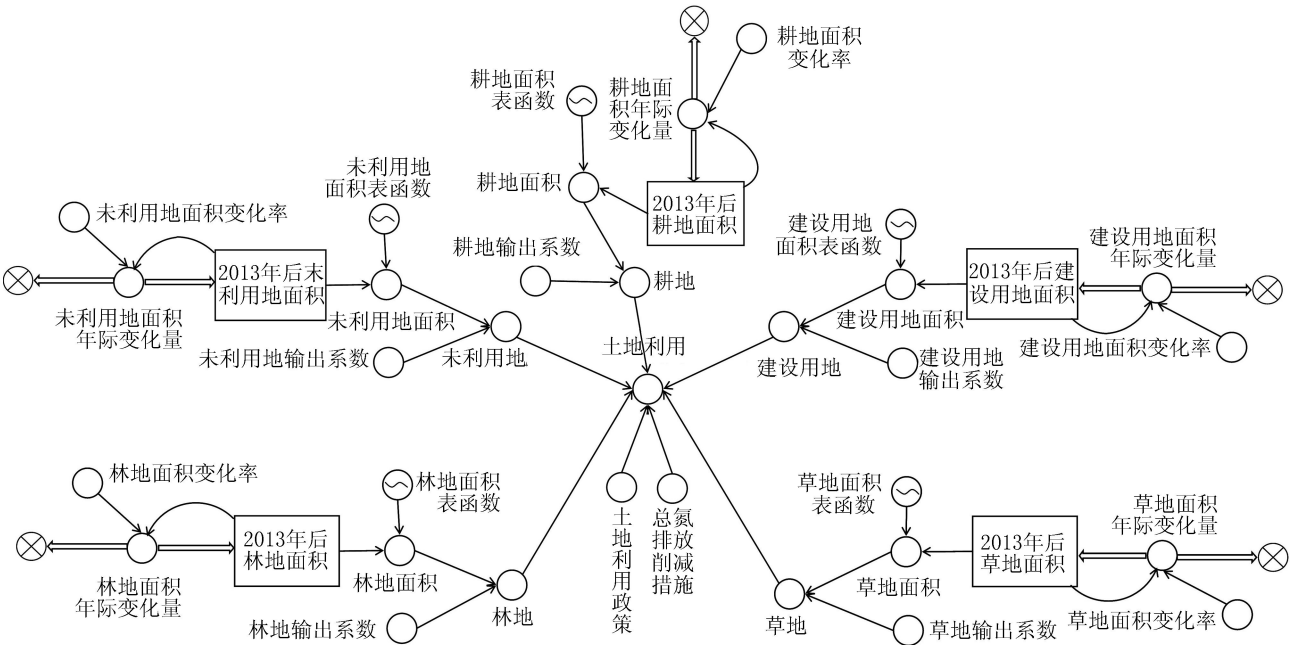


图 4 土地利用模块

时间界限为 2001—2030 年,时间步长为 1 a。以 2000—2013 年为验证期,验证期所涉参数根据历年《山西省统计年鉴》、《山西省地级市统计公报》中的历史数据由多元统计回归法、线性插值、表函数等方法得到;以 2014 年为预测期基准年,2015—2030 年为预测期,预测期参数参考《山西省土地利用总体规划(2006—2020)》、《山西省十三五规划纲要》得到。模型共涉及 11 个状态变量,11 个速率变量,46 个相关参数和决策变量以及 8 个表函数。汾河流域非点源污染 TN 负荷的土地利用、农村生活和畜禽养殖 3 个子模块分别如图 4~6 所示。

在土地利用模块(图 4)中,以 TM(30 m 分辨率)遥感影像为数据源,利用 GIS 和 RS 软件得到研究区 2000、2005、2010 和 2013 年 4 期土地利用矢量数据,并将土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种一级地类,统计结果见表 2。利用线性插值方法和 STELLA 中的表函数功能表示验证期的土地利用数据。根据《山西省土地利用总体规划(2006—2020)》取预测期耕地、林地、草地、建设用地和未利用地的年际变化率分别为: -0.20%、0.88%、-0.29%、4.6%、-0.80%。

表 2 汾河流域 2000、2005、2010、2013 年

4 期土地利用面积数据						10 ³ hm ²
年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	16 286	10 481	11 057	403	1 612	4.5
2005	16 597	11 124	10 058	354	1 709	1.0
2010	16 463	11 099	10 092	352	1 829	3.9
2013	16 330	11 074	10 126	347	1 957	6.3

在农村生活模块(图 5)中,受城镇化影响农村

人口年际变化较大,故用总人口和城镇人口的差值表示。通过对总人口与城镇人口历史数据的统计分析,设定其年增长率分别为0.84%、2%。

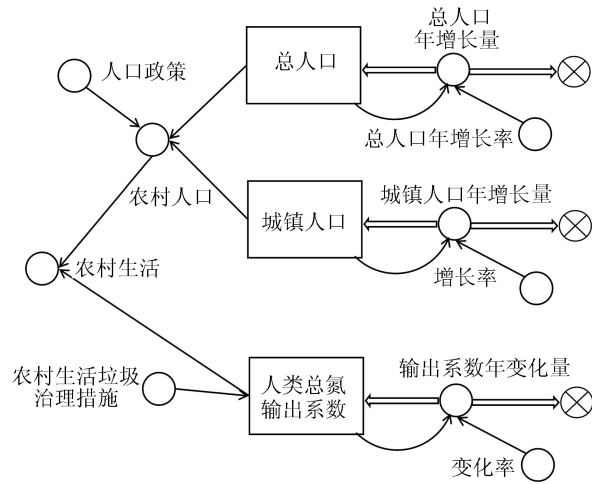


图5 农村生活模块

在畜禽养殖模块(图6)中,将排放量分为大牲畜、羊、猪、家禽4部分。验证期各牲畜数量由表函数表示;结合历史数据的变化规律与《山西省十三五规划纲要》中的发展目标,设定预测期大牲畜、羊、猪、家禽数量的年际变化率分别为0.1%、1.2%、2%、1.5%。

1.3.3 模型检验

依据2003—2013年《山西省统计年鉴》《山西省地市级统计公报》的数据,选择农村人口、总人口、大牲畜养殖量、耕地面积、建设用地面积5个关键变量进行模型的有效性验证。表3为农村人口、总人口、大牲畜养殖量的数据对比,表4为耕地面积和建设用地面积的数据对比。由表3~4可知模拟值与历史数据的相对误差均在8%以内,系统拟合度较好,该模型对汾河流域非点源污染负荷的模拟具有较高的可信度。

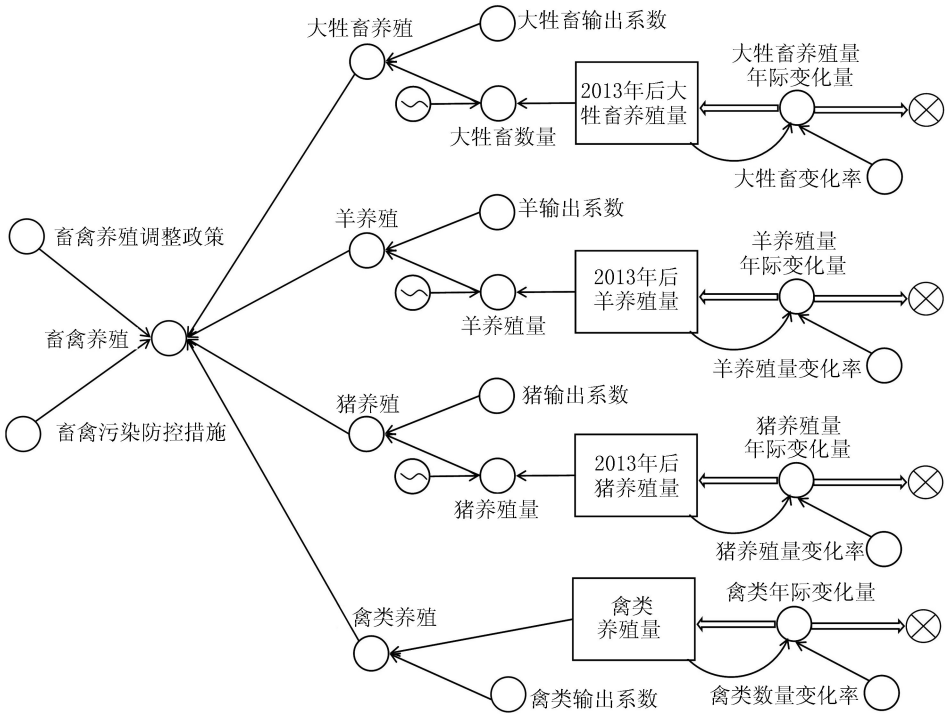


图6 畜禽养殖模块

表3 农村人口、总人口、大牲畜养殖量模拟值与历史数据比较

年份	农村人口			总人口			大牲畜养殖量		
	历史值/万人	模拟值/万人	误差/%	历史值/万人	模拟值/万人	误差/%	历史值/头	模拟值/头	误差/%
2003	1700.8	1796.9	5.66	2729.4	2740.2	0.39	733596	709606	3.27
2004	1688.1	1801.1	6.70	2746.1	2763.2	0.62	729804	723720	0.83
2005	1697.1	1805.1	6.36	2762.3	2786.4	0.87	738991	734140	0.66
2006	1719.3	1808.8	5.21	2777.9	2809.8	1.15	733680	703152	4.16
2007	1741.5	1812.4	4.07	2792.6	2833.4	1.46	729705	720027	1.33
2008	1775.3	1815.8	2.28	2807.3	2857.2	1.78	720819	704371	2.28
2009	1739.1	1819.0	4.60	2821.1	2881.2	2.13	730021	711292	2.57
2010	1753.0	1821.9	3.93	2933.5	2905.4	0.96	724396	704772	2.71
2011	1699.9	1824.7	7.34	2949.3	2929.8	0.66	717649	708577	1.26
2012	1730.9	1827.2	5.56	2963.7	2954.4	0.31	722589	701632	2.90
2013	1748.4	1829.4	4.64	2979.3	3000.0	0.70	738986	768159	3.95

年份	耕地面积			建设用地面积		
	历史值/ 10 ³ hm ²	模拟值/ 10 ³ hm ²	误差/%	历史值/ 10 ³ hm ²	模拟值/ 10 ³ hm ²	误差/%
2005	16 597	16 563.5	0.20	1 709	1 689.0	1.82
2010	16 463	16 230.1	1.41	1 829	1 860.3	1.71
2013	16 330	16 410.0	0.49	1 957	2 011.4	2.76

由于不同参数对模拟结果的影响程度不同,因此以非点源污染 TN 负荷为目标变量,利用 STELLA 软件中的敏感性分析功能进行关键参数的敏感性分析^[24],确定预测期对汾河流域非点源污染 TN 负荷影响较大的因子。综合考虑政策控制和科学治理两方面,本文选取了图 7 所示的 9 个参变量进行了敏感性测试。测试时分为 3 个等级,以率定值为中值(A),上(5A)、下(1/5A)各浮动 500%,输出结果见图 7。

由图 7 可知,流域非点源污染 TN 负荷对城镇人口、总人口与建设用地面积的增长率变化最为敏感,应是相关部门制定控制政策与进行污染治理时的主要切入点;而对林地面积、大牲畜数量增长率和畜禽养殖污染控制率的变化基本无响应,表明当前状况下在合理范围内增种林地或控制畜禽养殖的排污量对有效削减汾河流域非点源污染 TN 负荷意义不大。

2 方案模拟与分析

2.1 当前状况模拟

根据表 1 的输出系数值与流域统计资料,计算出 2014 年汾河流域的非点源污染 TN 负荷量见

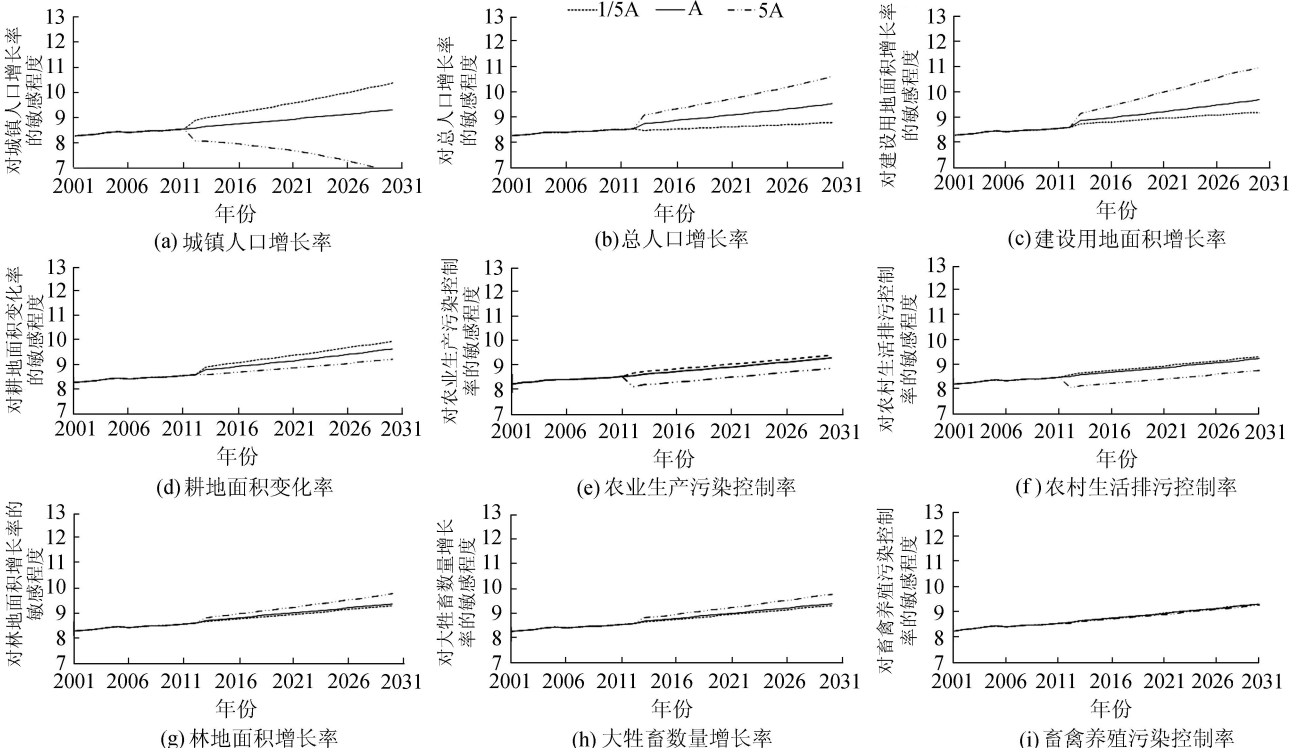


图 7 TN 负载总量对各变量敏感性分析结果

表 5。由表 5 可见,汾河流域 2014 年由非点源污染产生的 TN 负荷量达到 $8.961\times10^4\text{t}$,农业生产污染和农村生活污染对非点源污染 TN 负荷的贡献率较大,农村生活污染为最大来源。

项目	土地利用					农村生活	畜禽养殖	合计
	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地			
数值	2.841	0.465	0.179	0.249	0.006	3.578	1.652	8.961

在 STELLA 中对汾河流域 2001—2030 年的非点源污染 TN 负荷变化情况进行动态模拟,图 8 显示了在当前发展模式下,模拟期内土地利用、农村生活、畜禽养殖的 TN 的排放量及变化趋势,图 9 进一步揭示了不同土地利用类型的 TN 排放情况。由图 8 可见,不合理的土地利用方式和农村生活排放是汾河流域非点源污染 TN 负荷的主要来源,且农村生活 TN 排放量的增长速度更快,是当地非点源污染控制的关键。畜禽养殖的 TN 排放量相对较低,短期内对流域的非点源控制效果无显著影响,但其增长速度快,在更长的时间尺度内势必产生较大影响,故在养殖量扩大的同时需加强养殖业规模化建设和畜禽粪便的集中处理,控制该源的 TN 产生量。

由图 9 可知,由于化肥过量使用、污水灌溉、不合理的种植方式、落后的田间环境管理等原因,耕地与林地的 TN 排放量较高;但随着耕地面积的不断减少,其对流域 TN 负荷的贡献率逐渐下降。随着城镇化的加速发展,建设用地面积不断扩张,其 TN

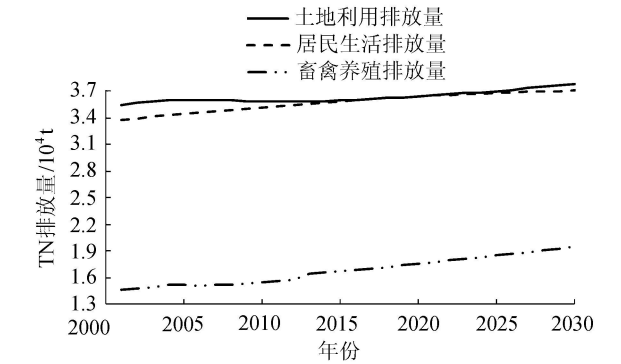


图8 模拟期汾河流域不同来源的 TN 排放情况

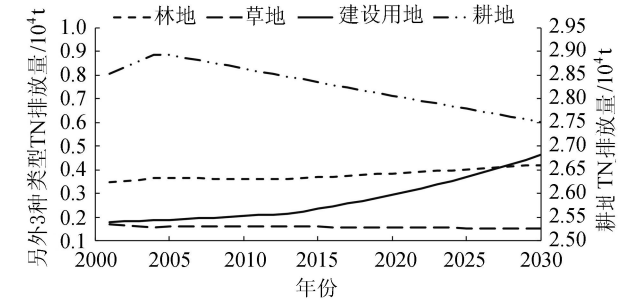


图9 模拟期不同土地利用类型的 TN 排放情况

排放量也急剧上升,逐步成为流域 TN 负荷的主要来源。因此采取有效措施降低建设区的 TN 排放具有重要意义。

2.2 方案设计与模拟

基于敏感性分析与当前状况下的模拟结果,重点考虑改善土地利用方式和控制治理农村生活污染2个方面,选取表6所示的10个决策变量设计4种非点源污染的防控方案并进行对比分析,寻求符合未来社会发展趋势下的减轻汾河流域非点源污染TN负荷的最佳途径。

调整项目	方案1	方案2	方案3	方案4
总人口增长率/%	0.84	-0.10		-0.05
城镇人口增长率/%	2.0	0.5	0.2	0.3
建设地面积增长率/%	4.6	2.0	1.0	1.5
城镇面源污染控制率/%		1.0	10.0	6.0
耕地面积减少率/%	0.20	0.10	0.05	0.08
林地面积增长率/%	0.88		3.00	1.00
农业生产污染控制率/%		1.0	10.0	6.0
农村生活垃圾处理率/%	10.0	10.0	1.0	5.5
农村排水系统改造率/%	17.4	8.0	0.8	4.5
养殖规模化建设率/%	23.5		5.0	2.0

方案1模拟了汾河流域在当前发展趋势下的非点源TN负荷变化情况。根据《山西省土地利用总体规划(2006—2020)》《山西省十三五规划纲要》及相关文献,设定各决策变量的取值见表6。方案2以控制治理农村生活污染为主,控制农村人口并强化农村的生活垃圾处理与排水系统改造;在土地利用和畜禽养殖方面仅做微小调整。方案3以改善土

地利用方式为主,合理调整流域的土地利用结构,将坡度较大的耕地改为林地,并采取科学有效措施降低城镇建设和农业生产造成的非点源污染。方案4为综合型发展方案,综合考虑上述方案的优缺点,以维持社会经济与生态环境协调发展为核心目标。方案2、3、4在当前发展模式下的调整幅度见表6。

在STELLA中对4种发展方案分别进行模拟,模拟结果见图10,可见,在当前发展模式下流域非点源污染产生的TN负荷呈明显上升趋势,至2030年时TN负荷较2010年增长6.83%,达 $9.437 \times 10^4 \text{t}$,若不加强防控必会加剧当地的水体恶化和生态环境破坏。相较于方案1,另外3种防控方案的TN负荷均有所减少,表明强化农村生活污水、垃圾的集中处理和改善土地利用方式是减轻汾河流域非点源TN负荷的有效途径。4种方案中综合型发展方案的TN削减效果最显著,至2030年时TN负荷较2010年削减了4.35%,该方案下,2030年时的TN排放量比当前发展模式减少了近9800t,比方案2和方案3分别减少1785t和5724t,表明在建设非点源污染防治控制项目与制定相关政策时,综合考虑土地利用与水废治理比单一倾向的措施更具现实意义。

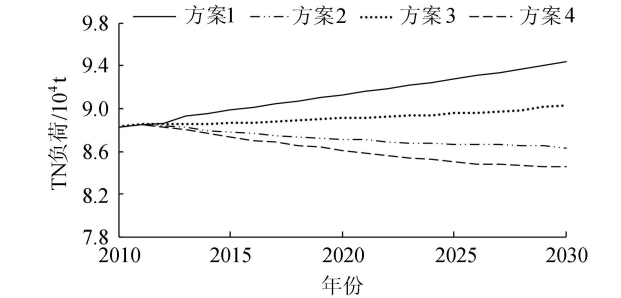


图10 不同方案下非点源 TN 负荷的变化曲线

3 结论与建议

a. 本文利用输出系数法和STELLA模型对汾河流域非点源污染TN负荷动态变化的模拟,结果表明,流域2014年由非点源污染产生的TN负荷量达到 $8.961 \times 10^4 \text{t}$,农村生活污染为最大来源,占总量的40.2%;基于当前的发展模式,在未来15年中流域的TN负荷将显著上升,不合理的土地利用与农村生活污染占有较大比重,畜禽养殖和城镇化建设占比较小但增长速度明显。

b. STELLA模型的敏感性分析表明,汾河流域在当前发展状况下,非点源TN负荷对城镇人口、总人口与建设用地面积的增长率变化最为敏感;而对林地面积、大牲畜数量增长率和畜禽养殖污染控制率的变化基本无响应。

c. 不同非点源污染防控方案在STELLA中的

仿真模拟结果表明,当前模式会加剧流域的 TN 负荷,强化农村生活污水、垃圾的集中处理和改善土地利用方式对 TN 有明显的削减效果,而综合型发展方案比单一倾向的措施更具现实意义。

d. 汾河流域在今后发展中应采取综合性措施,发展水土保持农业技术,强化农村生活固废与污水管理,减轻农村非点源污染,并通过合理规划建设用地、推广透水砖等方式减轻城镇发展带来的非点源污染。

参考文献:

[1] 杨林章, 冯彦芳, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101. (YANG Linzhang, FENG Yanfang, SHI Weiming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1):96-101. (in Chinese))

[2] 王晓宇. 汾河水库及其上游水环境状况分析及治理[J]. 水资源保护, 2010, 26(4): 89-94. (WANG Xiaoyu. Analysis of and suggestions for water environmental status of Fenhe Reservoir and upstream water [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 89-94. (in Chinese))

[3] BHADURI B, HARBOR J, ENGEL B, et al. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model [J]. Environmental Management, 2000, 26(6): 643-658.

[4] WANG J, WANG D J, ZHANG G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. Agricultural Water Management, 2014,141:66-73.

[5] 伍伟星,张可. 广西农村水环境污染模式及其治理对策[J]. 水利经济,2015,33(2):37-42. (WU Weixing, ZHANG Ke. Pollution modes of rural water environment in Guangxi Zhuang Aatonomous Region and their countermeasures [J]. Journal of Economics of Water Resources,2015,33(2):37-42. (in Chinese))

[6] 张勇, 汤洁, 李昭阳, 等. 吉林省招苏台河流域农业非点源污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(12):29-34. (ZHANG Yong, TANG Jie, LI Zhaoyang, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution in Zhaosutai Basin of Jilin Province [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(12): 29-34. (in Chinese))

[7] 刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2407-2414. (LIU Ruimin, YANG Zhifeng, DING Xiaowen, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2006, 27(12):2407-2414. (in Chinese))

[8] 王艾, 唐莉华, 王婷婷, 等. 基于 GBNP 模型的新安江上游流域非点源污染模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1261-1271. (WANG Ai, TANG Lihua, WANG Tingting, et al. Simulation of non-point source pollution in the upper basin of Xin' anjiang catchment using GBNP model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11):1261-1271. (in Chinese))

[9] 金蕾, 华蕾, 荆红卫, 等. 非点源污染负荷估算方法研究进展及对北京市的应用[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(4): 72-77. (JIN Lei, HUA Lei, JING Hongwei, et al. Review of nonpoint source pollution loads estimation methods and its application in Beijing City[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(4):72-77. (in Chinese))

[10] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383. (HAO Fanghua, YANG Shengtian, CHENG Hongguang, et al. A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 375-383. (in Chinese))

[11] JOHNES P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349.

[12] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 2008,27(2):677-682. (LIU Ruimin, SHEN Zhenyao, DING Xiaowen, et al. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 677-682. (in Chinese))

[13] SHRESTHA S, KAZAMA F, NEWHAM L T H. Catchment scale modelling of point source and non-point source pollution loads using pollutant export coefficients determined from long-term in-stream monitoring data[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2(3): 134-147.

[14] 李海鹏,张俊飏. 中国农业面源污染与经济发展关系的实证研究[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(6):585-590. (LI Haipeng, ZHANG Junbiao. An empirical test on the 'EKC' relationship between the agricultural non-point source pollution and economic development in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6):585-590. (in Chinese))

[15] 钟永光. 系统动力学[M]. 北京:科学出版社,2013.

[16] GAO W, HONG B, SWANEY D P, et al. A system dynamics model for managing regional N inputs from human activities[J]. Ecological Modelling, 2016, 332: 82-91.

[17] COLLINS R D, NEUFVILLE R D. Forest fire

management to avoid unintended consequences; a case study of Portugal using system dynamics [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 130(1): 1-9.

[18] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 40-45. (CAI Ming, LI Huaen, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 40-45. (in Chinese))

[19] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[20] 李怀恩, 王莉, 史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 541-544. (LI Huaen, WANG Li, SHI Shujuan. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shanxi Province water source area of the central line of South-North Water Diversion Project [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 541-544. (in Chinese))

与 技术, 2014, 34(1): 162-163. (CHEN Huilin, ZHU Kai. Research progress on characteristics and prediction of annual runoff[J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(1): 162-163. (in Chinese))

[7] 李红波, 夏潮军, 王淑英. 中长期径流预报研究进展及发展趋势[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 36-38. (LI Hongbo, XIA Chaojun, WANG Shuying. Research progress and development trend of medium and long term runoff forecasting [J]. Yellow River, 2012, 34(8): 36-38. (in Chinese))

[8] 云南省水文水资源局昭通分局. 昭通市水文特性研究[R]. 昭通: 云南省水文水资源局昭通分局, 1997.

[9] 范钟秀. 中长期水文预报[M]. 南京: 河海大学出版社, 2016.

[10] 包为民. 水文预报[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[11] GB/T 22482-2008 水文情报预报规范[S].

[12] 宋昭义, 谢开荣, 肖军, 等. 鲁甸“8·03”地震牛栏江红石岩堰塞湖水文预报误差及成因分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 6-11. (SONG Zhaoyi, XIE Kairong, XIAO Jun, et al. Ludian 8.03 earthquake Kraal River Hongshiyuan lake hydrological forecasting errors and the causes analysis [J]. Technology of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2016, 47(1): 6-11. (in Chinese))

[13] 张闻胜, 王银堂. 时间序列分解模型在水文要素中长期预报中的应用[J]. 水文, 2001, 21(1): 21-24. (ZHANG Wensheng, WANG Yintang. Application of time series decomposition model in long term prediction of hydrological elements [J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(1): 21-24. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-26 编辑: 徐娟)

+++++

(上接第 12 页) 利, 对灌区工农业生产及城镇生活用水安全有利. 工作中, 需加入时间序列分解模型^[13]等其他预测方法, 结合区域水文气象特点、气候趋势预测等对预测结果进行科学研判, 提高预报精度, 为流域水资源管理提供科学依据。

参考文献:

[1] 曹辉, 黄强, 白涛, 等. 径流预测方法对比分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 36-37. (CAO Hui, HUANG Qiang, BAI Tao, et al. Comparative analysis of runoff forecasting methods [J]. Yellow River, 2009, 31(9): 36-37. (in Chinese))

[2] 胡己坤, 曹丽青, 葛朝霞, 等. 非线性逐步回归在宜昌站年径流量预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 1-4. (HU Jikun, CAO Liqing, GE Zhaoxia, et al. Application of nonlinear stepwise regression in prediction of annual discharge at Yichang station [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 1-4. (in Chinese))

[3] 杨肖丽, 任立良, 江善虎, 等. 西辽河源头流域径流变化趋势及影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 37-41. (YANG Xiaoli, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. Analysis of trend and influencing factors of runoff variation in headwater basin of West Liaohe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 37-41. (in Chinese))

[4] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.

[5] 金光炎. 水文水资源随机分析[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1993.

[6] 陈汇林, 朱凯. 年径流的特征及预测研究进展[J]. 农业