

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.014

黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展

李家科, 彭 凯, 郝改瑞, 李怀恩, 李 舒

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:通过文献分析,总结了黄河流域非点源污染负荷定量化与污染控制两方面的研究进展,分析了黄河流域非点源污染研究现阶段存在的问题,即农业、城市非点源污染研究总体不多,自主研发模型少见、控制管理措施单一、新型污染物研究不足等。未来黄河流域地区需加大基础数据的监测,加强部门之间数据共享,建立非点源污染数据库;进一步对非点源污染机理进行探究,研发适合该流域的水文-水质-水动力非点源污染和水库水动力-水质耦合模型;深入非点源污染防控研究,制定全过程综合控制模式与管理模式。

关键词:非点源污染;负荷定量化;耦合模型;污染防控;黄河流域

中图分类号:TV213.4;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0090-13

Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin// LI Jiako, PENG Kai, HAO Gairui, LI Huaen, LI Shu (*State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: Through literature analysis, the research progress of non-point source pollution load quantification and pollution control in the Yellow River Basin is summarized. The current problems in the study of non-point source pollution in the Yellow River Basin is also analyzed. That is, there are few researches on agricultural and urban non-point source pollution, few independent research and development models, single control and management measures, and insufficient research on new pollutants. In the future, the Yellow River Basin needs to increase the monitoring of basic data, strengthen data sharing among departments, and establish a non-point source pollution database. Furthermore, the mechanism of non-point source pollution needs to be explored, and the coupling models of hydrology-water quality-hydrodynamic non-point source pollution and reservoir hydrodynamic water quality suitable for the basin should be developed. Digging into the research of non-point source pollution prevention and control, a whole process integrated control mode and management system should be developed.

Key words: non-point source pollution; load quantification; coupling model; pollution prevention and control; Yellow River Basin

水资源是国家自然资源开发利用和保护的关键与核心之一,也是与石油、粮食资源并列的三大战略性自然资源之一。随着国民经济的快速发展,三大产业用水对国内水环境产生很大负担,且我国人均水资源缺乏,水环境和水生态问题突出。一般来说,水体污染可分为点源污染(point source pollution)和非点源污染(non-point source pollution)^[1]。近些年随着政府部门对水污染治理的严加管控及高质量工程措施的实施,点源污染得到了显著控制。非点源污染来源于非特定的、分散的地区,地理边界和发生

位置难以识别和确定,具有随机性强、成因复杂、潜伏周期长等特征^[2-3]。国外以美国为代表,对非点源污染的研究开始于 20 世纪 60 年代,经过几十年的发展,在非点源污染特征、机理、模型与控制等方面已经形成了较为成熟的研究体系。相较于国外,我国非点源污染的研究较晚,始于 20 世纪 80 年代的湖泊富营养化调查,进入 90 年代以后开始活跃,研究对象主要聚集在三峡库区、太湖流域、密云水库、滇池流域、渭河流域等区域,在北京、上海、南京、天津、西安、广州等地也开展了大量城市非点源污染研

基金项目:陕西省重点研发项目(2019ZDLSF06-01);国家自然科学基金(52070157)

作者简介:李家科(1975—),男,教授,博士,主要从事流域非点源污染控制与城市雨洪管理研究。E-mail: xuat_ljk@163.com

究,主要通过经验模型、国外机理模型及改进方法等对目标区域进行研究,研究尺度分为空间和时间尺度。空间尺度包括径流小区、田间、流域、国家乃至全球尺度;时间尺度包括小时、日、月、年及世纪尺度等^[4]。近年来,将农业、城市非点源污染模型与现代技术相结合成了新的研究热点。黄河流域(图1)的非点源污染研究始于20世纪末,研究内容集中在典型支流非点源污染的监测及负荷量化方面。

黄河流域位于95°53'E~119°05'E、32°10'N~41°50'N,发源于青藏高原的巴颜喀拉山北麓,注入渤海湾,总面积79.5万km²。流经地区地势复杂多样,横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原及华北平原。根据2019年发布的《中国生态环境状况公报》,黄河流域劣V类水质占比8.8%,远高于全国3.3%的平均水平,其干流水质为优,部分支流为轻度污染,总体水质处于轻度污染^[5]。黄河是中华民族的母亲河,也是我国北方重要的生态屏障,更是横跨东、中、西部的重要经济区和能源基地,对维护国家和区域安全具有不可替代的重要作用。黄河流域水质的好坏直接影响到一带一路的建设,影响到国家西部大开发的战略布局,也关系到全流域1.07亿人口的用水安全与经济发展。黄河流域生态环境脆弱,其中非点源污染形势日益严峻,而且面临多要素耦合驱动及多时空尺度过程相互影响的挑战。本文通过阐述黄河流域非点源污染负荷量化与污染控制的研究进展,归纳出黄河流域非点源污染研究的不足,展望未来的研究方向,从机制和内涵上丰富流域非点源污染控制理论,期望有助于黄河流域非点源污染控制和水环境质量的提高,进一步实现“幸福河”的目标。

1 黄河流域非点源污染负荷量化研究

1.1 非点源污染机理研究

非点源污染机理研究是探讨氮、磷、新型污染物、微生物等在不同影响因素驱动作用下迁移和转化的过程,是认识其环境行为和进行污染防治的理论基础。可以从研究方法、影响因素、机理过程3方面进行总结。

1.1.1 研究方法

非点源污染研究主要包括选择典型小流域进行小区试验、人工模拟降雨试验^[6]、研究水质变化、同位素示踪技术等。对不同研究方法制定相应的监测方案是非点源污染研究的关键环节,吴喜军等^[7]提出了一套针对城区、农业区和流域的非点源污染监测方案,为非点源污染监测的规范化和标准化提供了技术参考。非点源污染物主要来源于地表径流,不同地理特征及耕作制度都影响污染物的流失过程,选择有代表性的径流小区,分析自然降雨条件下非点源污染的产生、迁移及转化规律的方法已被广泛应用。如:朱燕琴等^[8]基于安家沟流域2014—2016年自然降雨条件下监测资料,采用通径原理分析植被、降雨及下垫面等因素对径流量和产沙量的影响作用,发现雨强和植被类型是影响径流量的重要因子,径流量、盖度及降雨历时是影响产沙量较重要的因子。考虑到非点源污染的空间差异性和自然降雨条件的局限性,可采用人工降雨模拟进行研究,吕黎明^[9]在陇东黄土高原典型小流域设计研究不同雨强、坡度、植被覆盖度等条件对非点源污染的影响。不同种类非点源污染物最终汇入河流等天然水体,研究接纳水体水质变化规律也可反映非点源污染的影响。

稳定同位素示踪技术也是研究非点源污染最有

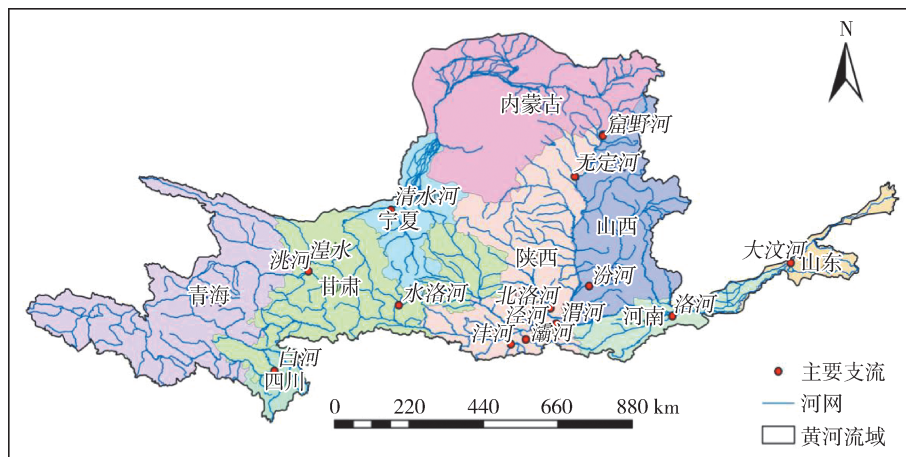


图1 黄河流域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Yellow River Basin

效的手段之一,具有专一、特异、可溯等特性,广泛用于非点源污染的源解析、迁移转化和分布规律等方面研究。运用C、N、O同位素技术可研究非点源污染物的环境行为、土壤侵蚀变化及识别环境中含氧酸盐物质(SO_4^- 、 NO_3^- 等)的来源等。土壤中有机质大部分来自植物,可根据稳定 $\delta^{13}\text{C}$ 判断土壤中各种有机质的来源;环境中的N因其来源不同和赋存形态的差异而具有特定的 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素值域特征,可据此甄别环境中含有氮素物质(含氮有机物、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 等)的来源^[10]。在黄河流域,同位素示踪技术在农业氮素气态损失与平衡、硝酸盐在城市河流的分布特征、人类活动对土壤侵蚀状态和生态环境的影响等方面有一定程度的应用^[11-13]。此外,借助一些其他示踪剂如 ^{11}B 、 ^{131}I 、 Cl^-/Br^- 等化学标记物,也可辅助甄别人为排放污水来源及其负荷贡献。

1.1.2 影响因素

影响非点源污染的主要因素包括气象水文、地形土壤、土地利用、植被覆盖和社会经济等。降雨径流是非点源污染物迁移转化的驱动力和载体,目前研究主要集中在暴雨径流作用下N、P等常规污染物的流失等方面。Liu等^[14]的研究表明,N、P的流失与降雨强度和前期土壤含水量呈正相关,而与植被覆盖度呈负相关。黄河流域面积广阔,地形地貌差异较大,人类活动影响强烈,构成其复杂多变的下垫面条件。地形因素主要通过坡度、坡长因子影响非点源污染过程,且相较于坡长,坡度对养分流失影响更大。不同的土壤类型(土壤结构、物化性质)及土地利用方式(植被类型、农田措施以及耕作方式)也会对非点源污染物的输出产生不同程度的影响^[15]。城市化发展是流域潜在非点源污染高风险区面积增大的重要因素。城市作为人类活动最集中的区域,其非点源污染来源广泛、机制复杂、治理困难。影响城市非点源污染主要因素包括气候状况及复杂的下垫面等因素。在西安市等地的研究表明,降雨时空分布特征、复杂的下垫面条件、大气干湿沉降等对城市地表径流污染物的浓度有很大影响^[16-18]。不同影响因素作用下会导致非点源污染的响应不同,对此进行深入分析是研究黄河流域非点源污染过程的关键。

1.1.3 机理过程

水文过程中的产汇流机制与非点源污染联系紧密。黄河流域大部分位于西北干旱半干旱地区,降水量分布严重不均,气候情况多变;产流过程也较复杂,半湿润区以蓄满产流为主,干旱半干旱区以超渗产流为主,源头产流还存在冻融的影响。下垫面条件变化会对产流机制产生重要影响,黄土区植被恢

复对产汇流机制有很大影响,随着植被的恢复,产流机制有由超渗产流向混合产流及蓄满产流转变的趋势;不同土壤含水量对冻融坡面产流也有较大影响,冻融作用会导致黄土坡面产流时间滞后,在含水量为20%时影响较显著^[19-20]。早有古籍记载“黄河斗水,泥居其七”,黄河水中泥沙主要来源于黄河流域中游的黄土高原地区,而夹杂在泥沙中N、P等营养盐是造成水体污染的主要因素,这是黄土高原区土壤侵蚀与非点源污染的一个显著特点。探究黄土高原地区土壤侵蚀的内在机理,对该区非点源污染研究具有显著的促进作用。Hao等^[21]对中游北洛河流域的非点源颗粒态氮磷污染进行定量分析,发现颗粒态氮磷负荷空间分布与土壤侵蚀分布具有一致性,耕地对应的颗粒态氮磷输出系数较高,在坡度 $8^\circ\sim 15^\circ$ 区域上颗粒态氮磷的输出系数最大,可见黄土区土壤侵蚀与坡度具有一定关系。非点源污染物迁移转化过程是污染物在降雨径流的冲刷和淋溶作用下,通过地表径流、壤中流和地下径流的途径输出,造成地表水和地下水的污染。许昌敏等^[22]认为,硝态氮难以被土壤颗粒吸附,是土壤氮素转化、迁移过程中最活跃的氮素形态,容易受淋溶过程影响;总氮和硝态氮的浓度随着淋溶次数的增加而减少,最终趋于稳定。

随着越来越多的新型污染物在水环境中被检测发现,其对整个生态系统带来的潜在高风险问题日益受到人们关注。目前对黄河流域新型非点源污染物的研究主要以污染物的种类调查及时空分布为主。研究发现,渭河关中段水体中抗生素主要为磺胺类和大环内酯类,抗生素浓度在上、中、下游分布存在显著差异,不同种类抗生素的空间分布特征不同,人口密度以及畜禽水产养殖对其影响较大^[23];渭河杨陵段多种耐药细菌及耐药基因检出率均为100%,耐药菌主要为耐头孢曲松细菌,耐药基因呈现出多样化,相较于国外处于中等水平^[24];在汾河流域,朱宇恩等^[25]着重分析了汾河沿岸农田土壤中4种喹诺酮类抗生素的残留情况及分布特征,发现其在汾河沿岸农田土壤中检出率达到98%以上,主要以诺氟沙星为主,其次为环丙沙星和氧氟沙星,恩氟沙星含量最低,且4种喹诺酮类抗生素含量受土壤理化性质和pH值的共同作用,在中下游残留浓度明显高于上游。针对新型非点源污染的研究,目前主要集中在环渤海湾及东南沿海等经济发达地区,我国其他地区研究不多,黄河中上游流域处于西北干旱半干旱地区,支流众多,典型支流的生态环境形势严峻,关于支流流域中不同类型新型污染物的研究更是少之又少。

水环境受到微生物污染而引起传染病暴发和流行一度是人类生存和发展的主要威胁之一。水体微生物污染是指潜藏于畜禽粪便及生活污水中的微生物(致病菌、寄生虫、病毒等)通过地表径流、土壤侵蚀以及人类活动等进入受纳水体对人类健康造成损害的污染^[26]。有研究表明我国各类地表水环境均遭受到不同程度的微生物污染,有的地区已出现水体中因微生物超标引发的安全事件^[26]。鉴别水体中微生物的来源及污染程度有助于对微生物污染的监管和防控,目前多采用微生物溯源技术。我国其他流域已有运用微生物溯源技术分析微生物污染的主要来源,对其污染特征、时空分布、防控等也有一定的研究^[27-28]。目前在黄河流域对水体微生物非点源污染的研究鲜见,后续有必要对黄河流域水体中微生物及其来源进行研究,并评估其对水环境的危害程度和人类健康威胁度。

1.2 非点源污染通量估算方法和模型

1.2.1 非点源污染通量估算方法

我国非点源污染研究的时间较短,缺乏长系列的监测数据,迄今为止也尚未将非点源污染纳入常规监测范围,现有的水文资料都是我国学者及相关单位根据科研课题获得,不能形成系统的监测体系。经过几十年的发展,国内学者围绕黄河流域特别是在黄河中游污染较重的渭河流域地区,在有限资料条件下相继提出了适合我国国情的非点源污染负荷估算方法,并取得一定的研究成果,这些原创性方法同时也应用到了我国其他流域非点源污染负荷的估算,表现出不错的效果。具体详见表1。

1.2.2 非点源污染模型

国外关于非点源污染模型研究较早,涌现出较

多经典的非点源污染模型^[43-54]。而我国非点源污染模型研究起步较晚,李怀恩等^[52]提出了国内首个具有机理基础的流域降雨径流非点源污染数学模型,此外,郝芳华等^[53]、宋文龙等^[54]在黄河流域非点源污染大尺度计算模型方面进行了重要探索。本文通过模型参数、时间尺度、模型组成、污染物类型、应用区域等方面对国内外常见的非点源污染模型进行总结,如表2所示,污染物主要考虑了有机污染物、重金属、农药等^[55-56]。同时,李怀恩等^[57]从20世纪90年代起,对陕西黑河水库流域进行研究,将非点源污染模型(流域降雨径流非点源污染数学模型、AnnAGNPS等)和水库水质模型(CE-QUAL-W2、MIKE等)相结合,在水库水质对非点源污染输入负荷的响应和水源保护的流域非点源污染控制方案等方面做了开拓性的工作。

1.2.3 新型非点源污染物模型

新型污染物进入环境后在不同介质中和介质间会发生迁移、扩散和转化,且种类繁多、理化性质各异、影响复杂,利用数学模型预测新型污染物在环境相中的分布及归趋是一种有效方法。逸度模型(fugacity model)具有结构简单、所需参数少且容易获得、结果直观等优点,在多介质环境中可以较好地模拟新型污染物在环境中的迁移转化及预测对环境可能造成的不利情况。近年来,使用逸度模型与水质模型结合评估有机污染物在河流系统的归趋取得了很好的效果,但是针对新型非点源污染物模型研究大多集中在我国沿海城市及南方发达地区^[58-59]。黄河流域鲜有对新型污染物进行研究,目前尚处于起步阶段。综合考虑还存在以下几点问题:新型污染物在水体中的迁移转化、对水中生物影响等机

表1 有限资料条件下非点源污染负荷估算方法

Table 1 Non-point source pollution load estimation method under limited data

估算方法	提出者	适用范围	应用案例	提出年份
平均浓度法	李怀恩 ^[29]	预测多年平均及不同频率代表年的非点源污染负荷量及特殊年份或次洪水的非点源污染负荷量	陕西黑河流域、渭河流域	2000年
水质水量相关法	洪小康等 ^[30]	降雨径流污染负荷量	汉江流域	2000年
水文分割法	陈友媛等 ^[31]	不同非点源污染年负荷量、不同频率代表年及某些特殊年份(如偏丰年)或次洪水的非点源污染负荷量	小清河流域	2003年
污染负荷-泥沙关系法	李怀恩等 ^[32]	次暴雨及代表年的非点源营养负荷量预测	陕西黑河流域、汉江流域	2003年
改进的输出系数法	蔡明等 ^[33]	非点源污染负荷估算	渭河流域	2004年
降雨量差值法	蔡明等 ^[34]	以降雨量为输入,估算非点源污染年负荷量	渭河流域	2005年
径流量差值法	胥彦玲 ^[35]	以地表径流量为输入,估算非点源污染年负荷量	陕西黑河流域	2007年
多沙河流非点源污染估算方法	李强坤等 ^[36]	将高含沙水流中的污染负荷分为水体中的溶解态污染负荷、泥沙吸附态负荷两部分估算非点源污染年负荷量	渭河流域	2008年
土地利用关系法	张亚丽等 ^[37]	预测土地利用变化后的非点源污染负荷	陕西黑河流域	2009年
综合平均浓度和综合输出系数法	Li等 ^[38]	估算土地利用变化后小流域的非点源污染负荷	香港地区	2003年
现代分析技术的非点源负荷估算	李家科等 ^[39-42]	利用现代技术(偏最小二乘法、自记忆模型、支持向量机、灰色神经网络)估算非点源污染负荷	渭河流域	2006—2011年

表2 非点源污染模型对比

Table 2 Comparison of non-point source pollution models

模型名称	参数形式	时间尺度	模型组成	污染物类型	应用地区
USLE	经验统计	长期连续	六参数乘法算式	泥沙、吸附态污染物等	陕西黑河流域、黄土高原 ^[43]
SWMM	分布	长期连续	径流过程、储水及水处理过程、污染物迁移过程等	降雨、雪径流过程、颗粒、微生物	黄河流域 ^[44]
ANSWERS	分布	长期连续	径流和入渗、泥沙以及蒸发、N、P模型、复杂污染物平衡等	营养盐、固定颗粒、重金属等	三峡库区 ^[45]
WEEP	分布	日	Green-Ampt Mein-Larsen 方程、运动波方程、水量平衡方程等	泥沙	黄土高原 ^[46]
AnnAGNPS	分布	小时或日	SCS 水文模型、RUSLE 模型,后期补充 N、P、COD 模块等	N、P、TOC、重金属等	黄土高原 ^[47]
HSPF	半分布	长期连续	Stanford 水文模型、RUSLE 模型、污染物迁移转化等	N、P、TOC、农药、微生物等	长江流域 ^[48]
SPARROW	集总、分布	日	非线性回归方程、污染源、污染物的土-水方程、河流湖库衰减方程等	N、P、TOC、农药等	新安江流域 ^[49]
SWAT	分布	长期连续	SCS 水文模型、RUSLE 模型、入渗、蒸发、融雪、污染物平衡	水量、泥沙、N、P、农药等	渭河流域、黄土高原 ^[50]
MIKESHE	分布	日、小时	Kristensen and Jensen 模型、圣维南方程、曼宁公式、线性水库法	N、P、重金属等	陕西灞河流域 ^[51]
流域降雨径流非点源污染数学模型	集总	单次暴雨	综合产流模型、逆高斯分布瞬时单位线汇流模型、产污模型等	水量、泥沙、N、P	黑河金盆水库、滇池 ^[52]
二元结构模型	集总	长期连续	土地利用类型、径流过程、污染物迁移过程等	COD、N、P、NH ₃ -N 等	黄河流域、长江流域等 ^[53]
DTVGM	分布	日	分布式时变增益模型、MUSLE 模型、QUAL-II 模型等	N、P、农药等	渭河流域 ^[54]

理研究不清;关于新型污染物量化的自主模型少见;新型非点源污染物研究时间短,数据累积少,亟须对这一热点问题进行深入研究。

1.3 黄河流域非点源污染通量特征

1.3.1 农业灌区非点源污染特征

黄河流域以 2% 的径流量养育了 12% 的人口,灌溉了 15% 的耕地,在地区经济发展中发挥了巨大作用。灌区是黄河流域比较重要的耕地类型,化肥、农药的大量使用引起的农业非点源污染也愈发受到人们的关注。对于农业非点源污染的研究,我国学者通常采取监测试验与模型模拟相结合的方法,研究主要污染物的时空分布特征、迁移转化机理及防控评价等内容^[60-61]。如李强坤等^[62]在黄河上游青铜峡灌区分析了主要污染物在灌区输水系统、田间系统和排水系统的运移特征,划分“源”“汇”模块构成完整的农业非点源污染负荷模型,并针对性地提出了农业源污染控制措施。郝芳华等^[63]在内蒙古河套灌区做了一系列研究,如水循环特征对土壤水运移的影响、不同耕作方式下土壤磷素的流失评价、不同灌溉季节土壤氮素的时空分布特征分析和盐分流失变化、灌区夏秋浇灌的氮磷元素迁移转化等。黄河流域拥有内蒙古河套、宁夏青铜峡、陕西宝鸡峡和泾惠渠、河南胜利渠及山东位山等大型灌区,农业非点源污染问题突出,推进流域化肥农药减量增效,减少非点源污染已势在必行。

1.3.2 城市非点源污染特征

黄河流域拥有兰西、宁夏沿黄、关中、中原及山东半岛等城市群,城市密集、人口多且扩展速度快,城市群带来的非点源污染问题非常关键。兰州市非点源污染研究表明,市区地表径流污染物浓度大于北京、上海等其他城市,这主要是与兰州市区环境较差、大气污染严重有关;且主要污染物 SS、COD、TP 的浓度表现为街道大于小区大于屋面, TN 表现为街道大于屋面大于小区的现象^[64]。在西安市,城市非点源污染研究取得了一定的成果,如李家科等^[65]发现西安城区的非点源污染呈区域性, SS、COD、重金属平均浓度在交通区最大, NH₃-N、TN、TP 平均浓度值在商业区最大。陈莹等^[66]分析了西安市路面径流污染随季节变化特征,发现 SS、COD 浓度呈现冬季高秋季低的变化趋势,表明其受交通污染源排放和大气降尘的共同影响; NH₃-N 浓度呈现秋冬季高夏季低的趋势,表明其主要与大气降水有关。王宝山等^[67]建立了汇流面污染物输送模型,对小区域雨水径流污染物 COD、SS 和 TN 进行了模拟,结果表明在降雨初期,污染物输送速度迅速增加,形成全面汇流时达到最大值,随后呈逐渐降低趋势。李怀恩等^[68]研究了西安市降雪径流污染特性,污染物 SS、COD、TN 的浓度在融雪径流初期高于融雪后期,相同地点降雨径流污染浓度高于降雪径流。黄河流域城市群非点源污染影响因素复杂(如尺度、自然要素、人

类活动、变化环境等),目前城市非点源污染研究尺度较多的针对城市某一片区,缺乏较大尺度研究。

1.3.3 流域非点源污染特征

通过非点源污染估算方法及模型模拟,研究流域污染物的通量、分布特征,可为流域非点源污染的治理提供有力的科学支撑,现有黄河流域非点源污染特征主要研究成果详见表3。

综上所述,目前黄河流域非点源污染研究主要集中在运用有限资料下的负荷估算方法和模型进行负荷定量、污染物源区识别和时空分布研究等方面。仍然存在一些不足,首先是非点源污染物缺乏系统性监测;其次在机理研究上,关于常规污染物和新型污染物的全过程研究较少,多是单一因素影响研究,研究深度不够^[78];估算方法上,大多是在有限资料下展开,不同估算方法对应的结果差异性较大,后续针对不同污染物来源还需精细化处理;模型研究上,我国自主研发的模型鲜见,多是直接或部分应用发达国家开发的模型。黄河流域地理条件变化大、地形地貌特殊且受人为活动影响大,对应用的机理模型参数要求很高,自主研发黄河流域的非点源污染模型及与河库(湖)耦合的模型亟待突破;特征研究上,局限于黄河干流某一断面、典型子流域和城市某一片区,且成果较多集中在黄河流域中游地区,缺乏黄河流域上下游的研究,不同污染源的入河通量不确定,仍然缺乏系统、深度的研究。

2 黄河流域非点源污染控制研究

由于流域非点源污染发生随机、过程复杂,再加

上其机理的模糊性,形成时的潜伏性,难以识别和确定,很难对其进行有效管理和控制。美国是开展非点源污染控制研究最早的国家,最先提出了“最佳管理措施(best management practices, BMPs)”和“低影响开发(low impact development, LID)”理念,并在一些地区展开试验研究,并取得了不错的效果^[79]。相对而言,中国关于非点源污染控制的研究时间短,但是也有比较系统的认识和方案^[80],目前黄河流域非点源污染控制的研究进展主要涉及源头控制、过程控制、末端治理及控制规划4方面。

2.1 源头控制

非点源污染控制的关键是污染源的控制,主要涉及农业、城镇、村庄生活等。在黄河流域,有研究表明,农业施肥是发生非点源污染的重要因素之一,最佳固氮固磷的土地利用类型是草地,林地次之,耕地最差,农田是N、P流失最主要的土地利用类型^[81]。此外,也有学者在内蒙古河套灌区研究了种肥+追肥和单一种肥的施肥方式下TN的流失量,发现在小麦、玉米两种农作物中,种肥+追肥能更好地削减TN负荷量^[82]。城市非点源污染源头控制方面,主要以LID和BMPs为主。西安市是非点源污染源头控制研究较多的区域,在主城区、沣西新城等地通过提出LID及BMPs等组合系统,使得道路景观与雨水处理有机地结合起来,达到控制城市非点源污染的效果^[83-84]。

2.2 过程控制

在非点源污染物进入接纳水体之前,采取拦截

表3 黄河流域非点源污染特征研究成果

Table 3 Study results of non-point source pollution characteristics in the Yellow River Basin

作者	位置	流域	研究内容	研究方法	结论
陈欣佛等 ^[69]	上游	湟水流域	污染物分布特征	肯德尔检验法	流域中游COD浓度较高,流域中下游NH ₃ -N浓度较高
	中游	渭河流域	污染通量占比	平均浓度法	COD、TN、TP占比超过30%,丰水年非点源污染是渭河流域水体污染一大主因
李家科等 ^[70-72]	中游	渭河关中段	污染监测与负荷估算	水文分割法、平均浓度法	泾河、沣河和灞河非点源污染物COD、TP、NH ₃ -N、TN年总负荷占比分别为43%、83%、64%、47%
	中游	渭河流域	源区识别和负荷估算	SWAT模型	泾河流域为关键源区,1990年(平水年)NH ₃ -N、NO ₃ -N输出负荷分别为3119.61t、8685.78t
李立 ^[50]	中游	渭河流域	P负荷时空分布	SWAT模型	TN、TP入河负荷分别为7654.0t、626.5t;蓝田县、长安区、旬邑县等是高污染区
李强坤等 ^[73]	中游	黄河干流潼关段	通量估算	平均浓度法	汛期污染通量以非点源污染为主,平水年(P=50%)的NO ₃ -N、NH ₄ ⁺ -N、TN和TP非点源污染负荷占全年比例依次为:37%、35%、80%和84%
黄康等 ^[74]	中游	泾河流域	通量、源区识别	输出系数法、等标污染负荷法	2017年TN、TP、NH ₃ -N输出负荷分别为124857t、5023t、26655t
张国明等 ^[75]	中游	汾河流域	污染物的输出动态	收支分析方法	TN、TP输出浓度主要受径流量影响,TN高浓度主要发生在枯水期,而TP高浓度主要发生在丰水期
张世杰 ^[76]	下游	三门峡、花园口和高村断面	通量估算	平均浓度法	黄河3个断面NH ₃ -N非点源污染负荷占总负荷比值分别为11.8%~88.4%、8.8%~85.1%、6.6%~89.5%
李硕等 ^[77]	下游	小清河流域	污染负荷时空分布特征	SWAT模型	汛期非点源污染负荷占比超过50%,TN、TP输出集中在流域南部区域

污染物措施减少污染进入水体就是过程控制,主要包括水保措施、植物篱、沉砂池等措施。李家科等^[85]应用 SWAT 模型对渭河支流泔河流域的径流、泥沙及营养盐污染负荷的产输出过程进行了模拟计算,提出实施水土保持措施如植树造林、种草、退耕还林等,加强水土流失区治理,减小土壤侵蚀可以有效减少污染。黄河流域耕地中坡耕地较多,坡耕地的水土流失会导致非点源污染加重。吴磊等^[86]提倡在黄土高原地区构建“乔-灌-草”多种组合形式的植物篱,并且修建流渠(管)、沉砂池等工程措施,多种措施相结合方法对非点源污染物的削减效果显著。

2.3 末端治理

末端治理作为非点源污染控制的最终措施,主要包括人工湿地、水陆交错带、植被过滤带、生态护岸等。研究表明,通过在农田周边开挖人工湿地和设置防护林带,在入河口、沿河两岸的农田边缘建立水陆交错带等多种组合措施,可以达到控制非点源污染的效果^[87];在河岸湿地,芦苇、蘆草、水烛等不同植被群落对农业非点源氮素均具有一定的控制功能,证明了河岸湿地对非点源污染的控制起到了重要作用,但3种植被对氮素污染的吸收有较大差异,具体表现为芦苇优于蘆草优于水烛^[88]。邓娜等^[89-91]发现植被过滤带对地表径流的悬浮固体、颗粒态氮、颗粒态磷、总氮、总磷都有较好的削减效果,且不同植被配置下的植被过滤带净化效果由好到差排序为:草地过滤带、灌草植被过滤带、空白带。此外,张学慧^[92]在汾河水库流域非点源污染控制中,采取设置缓冲带等措施完成负荷削减效果的模拟,发现设置缓冲带后,各非点源污染因子负荷量均有不同程度的削减,且削减比例随缓冲带宽度的增加而逐渐增大。

2.4 控制规划

非点源污染的控制规划涉及经济、决策、技术、意识等,在实现污染物最大削减效率的同时实现经济成本的最小化,通过这些措施的结合确定最优的控制方案,这对非点源污染的防控具有重要意义。毛战坡^[93]以陕西黑河流域为例,提出以土地利用方式为核心的非点源污染控制方案,以经济效益最大、非点源污染环境容量和土地利用面积等作为约束条件构建了多目标线性规划模型,提出设置植被保护带、控制人口数量等6种控制措施相结合来控制该区非点源污染。蔡明^[94]在渭河陕西段对非点源污染物氮提出设置不同的耕作方式、减少农药化肥使用、退耕还林、植被过滤带、湿地系统及多水塘系统等多种措施相结合的控制技术体系。其他流域控制规划研究采用了排污权交易模型,且考虑了环境容

量、工程型和非工程型控制措施、不确定性等因素;也有采用 SUNTAIN 系统在流域、农村社区、农户3个层面的 BMPs 组合方案优化模拟^[95]。

综上所述,黄河流域采用的源头控制、过程控制、末端治理及控制规划等措施的方案大多在较小范围实施;城市非点源污染控制多是利用模型模拟给出控制方案,缺乏措施实施后的评估。不论黄河流域还是其中的城市群,控制措施较多的是关注技术层面的防控,部分技术也建立了示范工程,但缺乏系统和全面的控制体系以及对整个农业及城市生态系统功能的恢复与优化,亟须构建黄河流域农业及城市结合的点源、非点源污染综合防控体系,将源头治理、过程控制和末端治理的控制技术进行集成、示范和标准化,未来研究比较关键的是扩大控制面、技术推广及后期阶段性效果的评估。

3 研究存在的不足与展望

3.1 不足

黄河流域非点源污染的负荷量化与污染控制已取得一定的研究成果,但是黄河流域跨度大,非点源污染物来源广泛,且在气候变化的大背景下,非点源污染的机制及内涵更加复杂,通过前期黄河流域非点源污染的研究回顾,发现还存在以下不足:

a. 流域和农业非点源污染方面。主要集中在黄河流域部分支流如渭河、汾河以及部分灌区。针对黄土区流域水沙过程与氮磷流失的特殊性,黄土高原非点源污染的机理、模型、防控等综合体系研究缺乏,缺少对黄河流域上、下游区域的研究。常规污染物和新型污染物多是单一因素影响研究,缺乏多要素综合影响分析。研究内容多是在有限资料条件下利用成熟的国外模型进行模拟,但存在输入数据要求高、长期数据资料缺乏、参数多且率定困难及不确定性等问题。缺少适合黄河流域多空间尺度和自主研发的水文-水质-水动力的非点源污染和水库水动力-水质耦合模型。

b. 城市非点源污染方面。主要以城市非点源污染模型软件 SWMM 模拟、LID 和 BMPs 研究为主。缺乏长期基础监测数据,研究对象多为城市某一片区,以整个城市或城市群为研究对象鲜见。

c. 非点源污染防控方面。控制措施较多关注技术层面的防控,对一些关键控制管理措施没有形成系统的规范与指南,也不能因地制宜形成全面的控制与管理体制。黄河流域非点源污染的研究区域呈现较大的不平衡性,通过文献分析发现大多数集中在黄河流域中游,上游、下游研究较少。这样的分布特点可能与黄河流域的地理特征与地区学科布局

存在着一定的关系。此外,黄河流域缺乏非点源污染管制的法律、政策和体制机制,诸多研究成果主要集中在生态环境领域方面,对于涉及社会性、经济性、政策性方面的内容则少有提及。流域的持续健康发展受到众多因素的综合影响,全面考虑才能对流域污染进行综合防控。

综上,黄河流域非点源污染研究还存在很大的不足。与国内外其他地区非点源污染研究相比,首先,黄河流域非点源污染研究总体上起步较晚,研究不够深入;其次,在研究尺度方面,空间尺度大多集中在小区、农田、小流域,时间尺度主要在小时、天、年尺度上,缺乏全流域、长序列等尺度研究。虽然国内学者针对我国国情提出了很多有限资料下非点源负荷估算的方法,但黄河流域不同地区非点源污染机理、自主模型构建、综合防控体系等研究亟待发展。

3.2 研究展望

污染物监测是研究非点源污染、模型软件运行的基础。后续应加强黄河流域常规、新型污染物基础数据的监测,各部门应加强数据合作共享,科学观测并建立长期有效的非点源污染监测数据库。针对目前研究状况,在非点源污染模型方面还需分别建立适合黄河流域、具有自主知识产权、能推广应用的“水文-水质-水动力非点源污染和水库水动力-水质耦合模型”。在原有研究基础上深入对黄河流域非点源污染物的产生、迁移转化、管理控制等过程研究,摸清黄河流域干支流非点源污染物的种类,探究负荷定量及关键源区确定的方法,并改进现有研究阶段只关注污染过程中某一环节的研究模式。

从我国国情出发,未来农业非点源污染研究仍是重点与热点。黄河流域地区村庄、耕地分布广泛,针对耕地中 N、P、农药、化肥流失,农村生活污水、畜禽养殖产生的粪便缺乏有组织排放等现状,可进行黄河流域农村污水处理与水系统健康循环模式研究。如,针对黄河流域农村污水分散排放、高氮磷低有机物的特点,实现污水的高效处理和水循环模式的健康可持续发展;针对黄河流域不同地区气候特征和排放要求,构建因地制宜、分类指导的农村污水治理技术体系;针对黄河流域不同区域经济社会发展水平,形成适合黄河流域村镇污水处理建管并重的长效运维机制。还应加强水土流失以及壤中流形成的非点源污染及其迁移转化、控制管理等整个复杂机理过程的不确定性研究。积极利用现代科学技术,如同位素示踪法与现有的研究方法相结合进一步加强该区农业非点源污染研究,形成一套适合该区的研究体系。城市非点源污染研究应从研究机理、模型及尺度 3 个方面展开。加大对黄河流域城

市非点源污染的产汇流污染过程、暴雨径流冲刷下的泥沙迁移转化、污染物的生化反应等机理过程的深入研究。尤其是黄土地区海绵城市建设的关键技术及问题研究,如雨水径流集中入渗对植物、土壤、地下水的累积效应及风险研究,LID 设施规范化与标准化研究等。建立适合该区的城市非点源污染的非点源污染模型,从城市某一区域的小尺度模拟过渡到以整个城市为研究对象的空间模拟。

黄河流域非点源污染的防控是进行非点源污染理论研究的最终目的。未来黄河流域非点源污染防控要从全流域、全过程进行综合治理,把 BMPs 充分运用到农业、城市非点源污染控制中来,通过明确各分区的非点源优化控制模式,定量模拟各单项控制措施及措施组合效果,筛选出最优防控方案,布设全流域非点源污染空间层次配置综合防控系统。考虑点源、非点源的综合控制和方案管理,因地制宜形成全过程控制与管理体制。做到如何将控制管理理论实施到实践当中是我国研究学者未来研究的重点。

新型非点源污染物也是近几年全球学者研究的热点,其对整个生态系统带来的潜在高风险问题已不可忽视。黄河流域目前关于这方面的研究少有报道,未来应重视新型非点源污染物的研究。可从新型污染物的来源解析、环境行为、过程控制技术与管理措施、生态风险分析等方面进行,探究其内在机理。在当今世界各国面临着新冠病毒威胁这一大形势下,还需探究黄河流域病原微生物潜在的健康风险,为后续防控奠定基础。

黄河流域生态环境保护和高质量发展的国家战略给黄河流域非点源污染研究带来新的机遇与挑战,从 2019 年 8 月至 2020 年 6 月,习近平总书记先后前往甘肃、河南、陕西、山西、宁夏 5 个省份进行调研,针对黄河流域提出一系列的治理理念,将生态保护与经济绿色发展放在同等重要的位置。对黄河流域非点源污染负荷量化与控制的系统深入研究有利于黄河流域水体污染的有效防治,从而助力地方经济建设和社会发展,为国家重大水环境战略任务的顺利实施以及黄河流域高质量发展提供有力的理论依据与技术支持。

参考文献:

- [1] 付超,苏晶,赵海萍,等. 基于 GIS 的漳河上游城市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护,2020,36(3):60-66. (FU Chao, SU Jing, ZHAO Haiping, et al. Estimation of urban non-point source pollution load in upper reaches of Zhanghe River based on GIS [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 60-66. (in Chinese))

- [2] 黄国如,陈晓丽,任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2019,35(4):9-16. (HUANG Guoru, CHEN Xiaoli, REN Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):9-16. (in Chinese))
- [3] 陈晓丽,雷勇,黄国如. 北江飞来峡库区流域非点源污染现状评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):44-48. (CHEN Xiaoli, LEI Yong, HUANG Guoru. Evaluation on non-point source pollution in Feilaixia Reservoir Area of Beijiang River[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):44-48. (in Chinese))
- [4] 娄和震,吴习锦,郝芳华,等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报,2020,40(5):1535-1549. (LOU Hezhen, WU Xijin, HAO Fanghua, et al. Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5):1535-1549. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2019年中国生态环境状况公报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2020.
- [6] 赵联芳,次仁吉保,王成,等. 强降雨下果园除草对径流中颗粒物及营养盐的影响[J]. 水资源保护,2019,35(3):57-62. (ZHAO Lianfang, CIREN Jibao, WANG Cheng, et al. Effect of orchard weeding on suspended solids and nutrients in runoff under heavy rainfall [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3):57-62. (in Chinese))
- [7] 吴喜军,李怀恩,李家科,等. 基于非点源污染的水质监测方案研究[J]. 环境科学,2013(6):2146-2150. (WU Xijun, LI Huaen, LI Jiake, et al. Study on water quality monitoring scheme based on non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2013(6):2146-2150. (in Chinese))
- [8] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等. 黄土丘陵区坡面产流产沙的影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(8):173-178. (ZHU Yanqin, ZHAO Zhibin, QI Guangpin, et al. Analysis of factors influencing runoff and sediment yield on slopes of loess hilly and gully region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8):173-178. (in Chinese))
- [9] 吕黎明. 陇东黄土高原典型小流域泥流起动机理及其运移数值模拟[D]. 兰州:兰州大学,2020.
- [10] FENECH C, ROCK L, NOLAN K, et al. The potential for a suite of isotope and chemical markers to differentiate sources of nitrate contamination; a review [J]. Water Research, 2012, 46(7):2023-2041.
- [11] 张惠. 黄河上游灌区稻田系统氮素气态损失及平衡研究[D]. 北京:中国农业科学院,2011.
- [12] 孙璐萍,邢萌,刘卫国. 黄土高原泾河小流域泥沙碳、氮同位素与生态环境示踪[J]. 水土保持学报,2013,27(4):273-277. (SUN Luping, XING Meng, LIU Weiguo. Organic carbon and nitrogen isotopes of the river sediments and ecological environment tracer in Jinghe basin of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4):273-277. (in Chinese))
- [13] 王博. 西安泾河流域硝酸盐氮同位素及氮循环示踪研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所),2018.
- [14] LIU Riumin, WANG Jiawei, SHI Jianhan, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469:1069-1077.
- [15] 刘贝贝. 北沙河小流域氮磷污染物的源解析及管理对策研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.
- [16] 聂启阳,吕继强,孙夏利,等. 土地利用变化影响的湡河流域潜在非点源污染风险时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):80-88. (NIE Qiyang, LYU Jiqiang, SUN Xiali, et al. Spatial and temporal variations of non-point source pollution risk affected by land use changes in Bahe River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5):80-88. (in Chinese))
- [17] 董雯,李怀恩,李家科. 城市雨水径流水质演变过程监测与分析[J]. 环境科学,2013,34(2):561-569. (DONG Wen, LI Huaen, LI Jiake. Monitoring and analysis on evolution process of rainfall runoff water quality in urban area [J]. Environmental Science, 2013, 34(2):561-569. (in Chinese))
- [18] 吴亚刚. 西安市文教区不同下垫面径流污染特征[D]. 西安:长安大学,2018.
- [19] 顾朝军. 黄土区土壤水文物理特性及流域产汇流机制变化对植被恢复的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [20] 段金晓,李鹏,李占斌,等. 模拟降雨下前期含水量对冻融坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(6):73-78. (DUAN Jinxiao, LI Peng, LI Zhanbin, et al. Effect of pre-period water content on freeze and thaw of slope under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation. 2017, 31(6):73-78. (in Chinese))
- [21] HAO Gairui, LI Jiake, LI Shu, et al. Quantitative assessment of non-point source pollution load of PN/PP based on RUSLE model; a case study in Beiluo River Basin in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27):33975-33989.
- [22] 许昌敏,王震洪,阴晓路,等. 大冲流域不同土地利用类型土壤的氮素淋溶模拟研究[J]. 贵州农业科学,2012,40(4):146-150. (XU Cangmin, WANG Zhenhong, YIN Xiaolu, et al. Study on nitrogen leaching in soils of different land utilization type in Dachong Watershed [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(4):146-150. (in

- Chinese))
- [23] 魏红,王嘉玮,杨小雨,等.渭河关中段表层水中抗生素污染特征与风险[J].中国环境科学,2017,37(6):2255-2262. (WEI Hong, WANG Jiawei, YANG Xiaoyu, et al. Contamination characteristic and ecological risk of antibiotics in surface water of the Weihe Guanzhong Section[J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2255-2262. (in Chinese))
- [24] 刘浩宇,朱瑜,王惠芝,等.渭河杨凌段水系中头孢曲松耐药菌和耐药基因[J].中国环境科学,2020,40(7):3087-3096. (LIU Haoyu, ZHU Yu, WANG Huizhi, et al. Prevalence of ceftriaxone-resistant bacteria and drug-resistance encoding genes in Weihe River and its tributaries in Yangling Section[J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 3087-3096. (in Chinese))
- [25] 朱宇恩,苗佳蕊,郑静怡,等.汾河沿岸农田土壤喹诺酮类抗生素残留特征及风险评估[J].环境科学学报,2019,39(6):1989-1998. (ZHU Yuen, MIAO Jiarui, ZHENG Jingyi, et al. Residual characteristics and risk assessment of quinolones in agricultural soil along the Fenhe River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 1989-1998. (in Chinese))
- [26] 郑萍,孙宗科,张伟,等.我国北方地区湖泊和水库水源水微生物污染及指示菌初步研究[J].环境与健康杂志,2019,36(11):1000-1002. (ZHENG Ping, SUN Zongke, ZHANG Wei, et al. Preliminary research on microbial contamination of lakes and reservoirs and bacteriological indicators in the north of China[J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(11): 1000-1002. (in Chinese))
- [27] 庄芳芳,苏建强,陈辉煌,等.基于高通量定量PCR研究城市化小流域微生物污染特征[J].生态毒理学报,2017,12(5):141-152. (ZHUANG Fangfang, SU Jianqiang, CHEN Huihuang, et al. Characterization of microbial contaminants using high-throughput quantitative PCR in a small urbanizing catchment[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(5): 141-152. (in Chinese))
- [28] 张麟杰,王淦淦,张利兰,等.重庆市河水中粪源微生物污染特征及源解析[J].中国环境科学,2019,39(3):1253-1260. (ZHANG Linjie, WANG Gangang, ZHANG Lilan, et al. Pollution characteristics and source track of fecal microorganism in the rivers across Chongqing city[J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1253-1260. (in Chinese))
- [29] 李怀恩.估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J].环境科学学报,2000(4):397-400. (LI Huaien. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000(4): 397-400. (in Chinese))
- [30] 洪小康,李怀恩.水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J].西安理工大学学报,2000(4):384-386. (HONG Xiaokang, LI Huaien. Correlation method of water quality and quantity and its application to load estimation of non-point source pollution [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000(4): 384-386. (in Chinese))
- [31] 陈友媛,惠二青,金春姬,等.非点源污染负荷的水文估算方法[J].环境科学研究,2003(1):10-13. (CHEN Youyuan, HUI Erqing, JIN Chunji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application [J]. Research of Environmental Sciences, 2003(1): 10-13. (in Chinese))
- [32] 李怀恩,蔡明.非点源营养负荷-泥沙关系的建立及其应用[J].地理科学,2003(4):460-463. (LI Huaien, CAI Ming. Relationship between non-point source nutrient load and sediment and its application[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003(4): 460-463. (in Chinese))
- [33] 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(7):40-45. (CAI Ming, LI Huaien, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7): 40-45. (in Chinese))
- [34] 蔡明,李怀恩,庄咏涛.估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005(4):102-106. (CAI Ming, LI Huaien, ZHUANG Yongtao. Rainfall deduction method for estimating non-point source pollution load for watershed [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2005(4): 102-106. (in Chinese))
- [35] 胥彦玲.基于土地利用/覆被变化的陕西黑河流域非点源污染研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [36] 李强坤,李怀恩,孙娟,等.基于有限资料的水土流失区非点源污染负荷估算[J].水土保持学报,2008(5):181-185. (LI Qiangkun, LI Huaien, SUN Juan, et al. The non-point source pollution loads estimation method in limited data of the soil and water loss region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008(5): 181-185. (in Chinese))
- [37] 张亚丽,李怀恩.土地利用关系法在非点源污染负荷预测中的应用[J].中国农学通报,2009,25(17):270-273. (ZHANG Yali, LI Huaien. Application of land use relation approach for non-point source pollution load prediction [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(17): 270-273. (in Chinese))
- [38] LI Huaien, LEE J H W, KOENIG A, et al. Nutrient load estimation in nonpoint source pollution of Hong Kong region [J]. Water Science & Technology, 2005, 51(3/4): 209-216.
- [39] 李家科,李怀恩,李亚娇.偏最小二乘回归模型在非点源污染负荷预测中的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007(4):218-222. (LI Jiake, LI Huaien, LI

- Yajiao. Application of partial least square regressive model in estimating the load of non-point source pollution [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007(4):218-222. (in Chinese))
- [40] 李家科,李怀恩,沈冰,等.基于自记忆原理的非点源污染负荷预测模型[J].农业工程学报,2009,25(3):28-32. (LI Jiake,LI Huaian,SHEN Bing,et al. Model for prediction of non-point source pollution load based on self-memory theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(3):28-32. (in Chinese))
- [41] 李家科,李怀恩,赵静.支持向量机在非点源污染负荷预测中的应用[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(6):756-760. (LI Jiake,LI Huaian,ZHAO Jing. Application of support vector machine method in prediction of non-point source pollution load [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006,38(6):756-760. (in Chinese))
- [42] 李家科,李亚娇,李怀恩,等.非点源污染负荷预测的多变量灰色神经网络模型[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(3):229-234. (LI Jiake, LI Yajiao, LI Huaian, et al. Multi-variable grey-neural network model for non-point source pollution load prediction [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(3):229-234. (in Chinese))
- [43] KINNELL P I A. Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: a review [J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1/2/3/4):384-397.
- [44] 李思祎,张建丰,李涛,等.基于SWMM模型的LID设施的雨洪控制效果分析[J].中国农村水利水电,2019(6):60-65. (LI Siwei,ZHANG Jianfeng,LI Tao,et al. An analysis of rainfall flood control effect of LID based on SWMM model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(6):60-65. (in Chinese))
- [45] 牛志明,解明曙,孙阁,等. ANSWER2000 在小流域土壤侵蚀过程模拟中的应用研究 [J]. 水土保持学报, 2001(3):56-60. (NIU Zhiming, XIE Mingshu, SUN Ge, et al. Applying ANSWERS2000 to simulate soil erosion process on two watersheds of three gorges area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001(3):56-60. (in Chinese))
- [46] 岳东霞,朱敏翔,杨超,等.基于GeoWEPP模型的桥子沟流域土壤侵蚀对比研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(1):96-105. (YUE Dongxia, ZHU Minxiang, YANG Chao, et al. Comparison of soil erosion effects on the Qiaozigou Watershed based on the GeoWEPP model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(1):96-105. (in Chinese))
- [47] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等. AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区小流域的适用性评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):13-19. (YAN Shengjun, GUO Qingxia, YAN Rui, et al. Suitability evaluation of AnnAGNPS model in Chakou watershed of typical loess hilly region [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1):13-19. (in Chinese))
- [48] 程晓光,张静,官辉力.半干旱半湿润地区 HSPF 模型水文模拟及参数不确定性研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(12):3179-3187. (CHENG Xiaoguang, ZHANG Jing, GONG Huili. HSPF hydrologic simulation and parameter uncertainty in a semi-arid and semi-humid area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12):3179-3187. (in Chinese))
- [49] 卢诚,李国光,齐作达,等. SPARROW 模型的传输过程研究:以新安江流域总氮为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1):7-13. (LU Cheng, LI Guoguang, QI Zuoda, et al. Research on the transport processes of SPARROW model: a case study for total nitrogen in Xin'anjiang River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(1):7-13. (in Chinese))
- [50] 李立.渭河流域咸阳—西安段非点源污染模拟研究 [D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [51] 田开迪,沈冰,贾宪. MIKE SHE 模型在灞河径流模拟中的应用研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):91-95. (TIAN Kaidi, SHEN Bing, JIA Xian. Application of MIKE SHE model in runoff simulation of Bahe river basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1):91-95. (in Chinese))
- [52] 李怀恩,沈晋.非点源污染数学模型 [M]. 西安:西北工业大学出版社,1996.
- [53] 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(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(3):375-383. (in Chinese))
- [54] 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 Wenlong, YANG Shengtian, LANG Yang, et al. Evaluation of pollution load for large-scale and non-point source COD in Weihe Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6):31-36. (in Chinese))
- [55] 《黑河引水工程水源保护研究》课题组.黑河引水工程水源保护研究技术总报告 [R]. 西安:西安理工大学, 1998.
- [56] 朱磊,李怀恩,李家科,等.水文水质模型联合应用于水库水质预测研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(3):571-576. (ZHU Lei, LI Huaian, LI Jiake, et al. Connecting hydrological and water quality models for prediction research of reservoir water quality [J]. China Environmental Science, 2012, 32(3):571-576. (in Chinese))
- [57] 李怀恩,李家科.流域非点源污染负荷定量方法研究与应用 [M]. 北京:科学出版社,2013.

- [58] 余情情. 基于IV级逸度模型的典型抗生素环境归趋行为动态模拟与风险评估研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [59] 张毅, 马艳飞, 宋帅, 等. 环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2625-2634. (ZHANG Yi, MA Yanfei, SONG Shuai, et al. Fate simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim using the multimedia model[J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2625-2634. (in Chinese))
- [60] 江军. 黄土高原地区农业面源污染时空特征及与经济发展关系研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [61] 王琼. 基于SWAT模型的小清河流域氮磷污染负荷核算及总量控制[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2015.
- [62] 李强坤, 李怀恩. 农业非点源污染数学模型及控制措施研究: 以青铜峡灌区为例[M] 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [63] 郝芳华, 欧阳威. 北方平原农业非点源污染研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [64] 张媛. 兰州市区地表径流污染初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [65] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 西安市城区非点源污染特性与负荷估算[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 131-138. (LI Jiake, LI Huairen, DONG Wen, et al. Estimation of non-point source pollution characteristics and loading in Xi'an urban areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 131-138. (in Chinese))
- [66] 陈莹, 赵剑强, 胡博, 等. 西安市城市主干道路面径流污染负荷研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 112-117. (CHEN Ying, ZHAO Jiaoqiang, HU Bo, et al. Study on the pollution load of the urban trunk-road runoff in Xi'an [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 112-117. (in Chinese))
- [67] 王宝山, 黄廷林, 程海涛, 等. 小区域雨水径流污染物输送研究[J]. 给水排水, 2010, 46(3): 128-131. (WANG Baoshan, HUANG Tinglin, CHENG Haitao, et al. Research on the transport of rainwater runoff pollutants in small areas [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 46(3): 128-131. (in Chinese))
- [68] 李怀恩, 刘增超, 秦耀民, 等. 西安市融雪径流污染特性及其与降雨径流污染的比较[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2795-2802. (LI Huairen, LIU Zengchao, QIN Yaomin, et al. Characteristics of snow-melt runoff pollution and comparison with rainfall runoff pollution in Xi'an City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11): 2795-2802. (in Chinese))
- [69] 陈欣佛, 柴元冰, 闵敏. 基于Kendall检验法的湟水水质变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 97-101. (CHEN Xinfo, CAI Yuanbing, MIN Min. Analysis of variation trend of huangshui water quality based on Kendall method[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 97-101. (in Chinese))
- [70] LI Jiake, LI Huairen, SHEN Bing, et al. Effect of non-point source pollution on water quality of the Weihe River [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26(1): 50-61.
- [71] 李家科, 李怀恩, 董雯, 等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1470-1478. (LI Jiake, LI Huairen, DONG Wen, et al. Monitoring and load estimation of non-point source pollution on typical tributaries in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1470-1478. (in Chinese))
- [72] 李家科, 刘健, 秦耀民, 等. 基于SWAT模型的渭河流域非点源氮污染分布式模拟[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 278-285. (LI Jiake, LIU Jian, QIN Yaomin, et al. Distributed simulation on nitrogen non-point source pollution in the Weihe river watershed based on SWAT Model [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 278-285. (in Chinese))
- [73] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008(4): 460-466. (LI Qiangkun, LI Huairen, HU Yawei, et al. Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2008(4): 460-466. (in Chinese))
- [74] 黄康, 李怀恩, 李家科, 等. 泾河流域农业非点源污染解析[J/OL]. 人民黄河: 1-6. (HUANG Kang, LI Huairen, LI Jiake, et al. Analysis of agricultural non-point source pollution in the Jinghe river basin [J/OL]. Yellow River, 1-6 [2020-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/Detail/41.1128.TV.20200722.1334.006.html>. (in Chinese))
- [75] 张国明, 高扬, 李兆君, 等. 汾河上游岚河流域非点源输出动态研究[J]. 水土保持学报, 2008(2): 102-106. (ZHANG Guoming, GAO Yang, LI Zhaojun, et al. Study on non-point resource dynamic transport of Lanhe watershed located in Fenhe River's upstream [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008(2): 102-106. (in Chinese))
- [76] 张世杰. 黄河下游非点源污染负荷及临界输沙量研究[J]. 水资源研究, 2018, 7(2): 199-206. (ZHANG Shijie. Non-point source pollution and critical sediment in the lower reaches of the Yellow River [J]. Journal of Water Resources Research, 2018, 7(2): 199-206. (in Chinese))
- [77] 李硕, 王红旗, 王国强, 等. 小清河流域非点源污染负荷与降水关系研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 147-158. (LI Shuo, WANG Hongqi, WANG Guoqiang. Study on relationship between non-point source pollution and precipitation in Xiaoqinghe River Watershed [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 147-158. (in Chinese))

- [78] 沈珍瑶. 流域非点源污染模拟与控制面临的挑战 [C]//第十七届中国水论坛论文集. 北京:第十七届中国水论坛,2019.
- [79] JAIN C H, SINGH S. Best management practices for agricultural non-point source pollution: policy interventions and way forward[J]. World Water Policy, 2019, 5(2).
- [80] 李家科, 李怀恩, 李亚娇, 等. 城市雨水径流净化与利用技术研究: 以西安市为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [81] OUYANG Wei, SKIDMORE A K, TOXOPEUS A G, et al. Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 373-380.
- [82] 吴用. 内蒙古河套地区流域非点源污染模拟及区域污染物总量控制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [83] 王立峰. 西安市城市道路绿地海绵城市建设研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [84] 张蓓. 不同尺度低影响开发设施调控效果模拟与优化设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [85] 李家科, 杨静媛, 李怀恩, 等. 基于 SWAT 模型的陕西洋河流域非点源污染模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 11-17. (LI Jiake, YANG Jingyuan, LI Huaen, et al. Simulation on non-point source pollution based on SWAT model in Fenghe River watershed of Shaanxi Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(4): 11-17. (in Chinese))
- [86] 吴磊, 马孝义. 黄土高原水土流失型非点源污染过程模拟研究进展[J]. 中国科技论文, 2015, 10(13): 1497-1506. (WU Lei, MA Xiaoyi. Research progress in erosion-type nonpoint source pollution process simulation of the Loess Plateau [J]. China Science Paper, 2015, 10(13): 1497-1506. (in Chinese))
- [87] 李强坤, 孙娟, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区农业非点源污染控制措施及其效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 141-144. (LI Qiangkun, SUN Juan, HU Yawei, et al. Control measures of agricultural non-point source pollution in Qingtongxia irrigation district and effects analysis [J]. Journal of Argo-Environment Science, 2010, 29(1): 141-144. (in Chinese))
- [88] ZHAO Tongqian, XU Huashan, HE Yuxiao, et al. Agricultural non-point nitrogen pollution control function of different vegetation types in riparian wetlands: a case study in the Yellow River wetland in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(7): 933-939.
- [89] 邓娜, 李怀恩, 李家科. 植被过滤带的净化效果研究及数学模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [90] 庾从蓉, 段佩怡. 植被过滤带的污染物去除效率研究进展[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 68-74. (YU Congrong, DUAN Peiyi. Quantitative research advance on vegetative filter strips for non-point source pollution control [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 68-74. (in Chinese))
- [91] 李颖, 庾从蓉, 孙钰峰, 等. 降雨强度对植被过滤带中胶体迁移过程的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 112-116. (LI Ying, YU Congrong, SUN Yufeng, et al. Effect of rainfall intensity on colloid migration in vegetation filter strips [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 112-116. (in Chinese))
- [92] 张学慧. 汾河水库流域非点源污染特征及污染贡献模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016
- [93] 毛战坡. 黑河流域非点源污染控制规划研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- [94] 蔡明. 渭河陕西段氮污染及控制规划研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [95] 耿润哲. 流域非点源污染及管理措施优化配置研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.

(收稿日期: 2020-11-13 编辑: 王 芳)

· 简讯 ·

《水资源保护》被评为第 5 届中国精品科技期刊

《2020 年中国精品科技期刊》于 2020 年 12 月 29 日发布,《水资源保护》被评为第 5 届中国精品科技期刊。第 5 届中国精品科技期刊包括 300 种中文出版的中国精品科技期刊和 20 种英文出版的中国国际化精品科技期刊,是中国科学技术信息研究所根据“中国精品科技期刊遴选指标体系”,采用定量分析和定性分析相结合的方法,从 2 100 多种中国出版的自然科学领域科技核心期刊中遴选出的,是中国各学科领域中重要且能反映本学科发展水平的科技期刊。

2000 年开始,为打造中国精品科技期刊,推动中国科技期刊评价体系的研究,提高中国科技水平,国家科技部开展了“中国精品科技期刊战略研究”和“中国精品科技期刊服务与保障系统”的研究工作。中国科学技术信息研究所承担国家科技部中国科技期刊战略相关研究任务,在国内首先提出了“中国精品科技期刊”的概念,并于 2008 年进行首次评选。“中国精品科技期刊”暨“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊评选工作每 3 年一届,已分别于 2008 年、2011 年、2014 年和 2017 年发布了 4 届中国精品科技期刊评选结果。

(本刊编辑部 供稿)