

丹汉江流域非点源污染定量化与控制研究进展

李亚娇¹, 张子航¹, 李家科², 郝改瑞²

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 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: 丹汉江流域位于汉江中上游,是丹江口水库的主要水源区,其水质的优劣直接关系到国家南水北调中线工程的成败,因此对该流域的非点源污染研究显的尤为重要。通过查阅文献,总结了该流域泥沙和养分在不同空间尺度下的输移特征,归纳了多种负荷估算方法和模型应用进展,从源头、过程和末端3个方面阐述了水土以及养分流失的控制措施和生态补偿研究进展。并指出当前非点源污染源及污染过程和输移特征尚不清晰、应用模型较少且自主建立模型鲜见、污染控制与管理措施零散等问题。未来需要不断加强资料的系统监测,探明该流域非点源污染种类、来源及负荷,提高应用模型种类和精度,建立流域土地、水域最优开发和管理模式,逐步完善定量化研究与控制体系。

关键词: 非点源污染; 负荷定量化; 非点源污染模型; 污染控制; 丹汉江流域

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2020)02-0019-09

Research progress on quantification and control of non-point source pollution in the Danjiang and Hanjiang River Basin

LI Yajiao¹, ZHANG Zihang¹, LI Jiako², HAO Gairui²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Danjiang and Hanjiang River Basin, located in the middle and upper reaches of the Hanjiang River, is the main water source of the Danjiangkou Reservoir. Its water quality determines the success or failure of the National South - North Water Transfer Project. Therefore, the study of non-point source pollution in this basin is of grave importance. By reviewing the literatures, we summarized the transport characteristics of sediments and nutrients in different spatial scales in the basin, compared various load estimation methods and model application progress of the non-point source pollution, and expounded the control measures of water, soil and nutrient loss, as well as the research progress of ecological compensation from three aspects of the source, process and end control. It is found that the sources, process and transport characteristics of current non-point source pollution are still unclear. There are few application models and even fewer models developed by individuals, and the pollution control and management measures are scattered. In the future, it is necessary to continuously strengthen the systematic monitoring of data, to identify the types, sources and loads of non-point source pollution in the basin, as well as to improve the type and accuracy of the application models, so as to establish optimal development and management methods for the land and water in watershed, and improve the quantification research and control system.

Key words: non-point source pollution; quantification of load; model of the non-point source pollution; pollution control; Danjiang and Hanjiang River Basin

收稿日期:2019-07-13; 修回日期:2019-10-30

基金项目:陕西省重点研发计划(2019ZDLSF06-01); 国家自然科学基金项目(51879215)

作者简介:李亚娇(1978-),女,辽宁大石桥人,博士,副教授,主要从事环境水文方面研究。

1 研究背景

20世纪80年代以来,由于中国城市化进程的加快和工业的发展,水资源日益匮乏,水环境污染已不容忽视。在流域水管理领域,非点源污染被认为是同时影响流域水环境与水生生态安全的重要因素。非点源污染是指累积在地表的污染物经由降雨所产生的地表径流或地下径流进入水体造成的污染^[1-2]。非点源污染的产生由自然过程引发,污染物来源广泛模糊,成分复杂且类型多样,研究与控制难度大。目前,随着点源污染控制技术的不断发展,关于非点源污染对流域水环境影响的研究已然占主导地位。

丹汉江流域是我国南水北调中线工程的主要水源区,位于 $31^{\circ}42' \sim 34^{\circ}11'N$, $106^{\circ}47' \sim 111^{\circ}18'E$ 。其中汉江地处南北过渡、东西交替的秦巴山区,是长江的一级支流,流域面积 $62\,293\text{ km}^2$ 。丹江流域面积为 $7.551 \times 10^3\text{ km}^2$,在丹江口水库与汉江汇合,是陕西省引汉济渭的引水源地^[3],丹汉江流域如图1所示。

丹汉江流域水质的优劣,直接关系到国家南水北调中线工程的成败。同时,保障丹汉江流域水质安全更是关中地区用水安全与经济发展的前提,做好污染控制与水质保障将有力支撑关中地区的率先发展和关中平原城市群的建设。然而流域内山高坡陡,土壤瘠薄,农村区域面积占比较大,耕作粗放,易发生水土流失,造成流域生态环境的不断退化,水生态承载力处于弱可承载状态^[4]。并且当地居民环保意识较差,农村生活污水、生活垃圾等没有经过妥善处理随意排放进入河流,形成恶性循环。为此,本文对该流域非点源污染的迁移转化、负荷估算以及控制等方面的研究进行了系统的归纳总结,以期为水源区水质保护和“一江清水进京”的战略目标提供科学支撑。



图1 丹汉江流域图

2 非点源污染负荷定量化研究进展

2.1 非点源污染输移特征

丹汉江流域主要位于汉中、安康、商洛和十堰4个市,多年平均降水量为 904.7 mm ,夏季占全年降水量的近一半^[5-6]。此地区石厚土薄、耕垦过度、壤中流发育活跃及降雨较为集中,导致水土流失突发性很强,降雨径流过程改变较大,影响养分输出特征。因此通过对丹汉江流域的非点源污染输移特征研究,有助于改善水源区的水质,进一步提出相应的治理对策。

2.1.1 坡面尺度下的输移特征 坡面作为研究非点源污染观测最直接和实验最容易实现的单元,也是流域水土流失发生和发展的基本单元^[7]。刘泉等^[8]在石泉后沟小流域3场天然降雨中发现该地区坡地产流表现为蓄满产流,壤中流是坡地养分流失的重要途径。然而天然降雨条件下获取试验数据的周期长并且难以分别监测地表径流和壤中流,为进一步明晰壤中流在坡面侵蚀产沙以及养分输出中的作用,彭圆圆等^[9]与徐国策等^[10]对地表径流和壤中流的养分流失差异进行了研究,发现壤中流中的氮素养分流失量占总流失量比例较大,其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 最大占比为 61.4% ,TN占坡面TN总流失量的 50% 左右。壤中流中的磷素浓度与地表径流磷素浓度均值基本相同,但产流量很小,对坡面磷素流失影响较小。坡面径流中壤中流氮素流失浓度远高于地表径流,而磷素浓度相差不大,这可能与当地特殊的产流方式以及土壤的淋溶作用有关。许多学者认为在坡面尺度下氮素流失的主要形态是硝态氮和铵态氮,坡地土壤养分流失除了溶解在径流中并随着径流流失外,还有一部分是吸附和结合在泥沙颗粒表面以无机态和有机质形式流失的养分^[11]。刘泉等^[12]通过坡面人工模拟降雨试验,研究发现硝态氮是径流中全氮流失的主要形式。在小雨强下,硝态氮的淋溶与土壤侵蚀同步进行;大雨强下,硝态氮流失以泥沙携带为主。

污染物随径流、泥沙迁移过程是一个复杂的物理、化学及生物过程,目前对于不同降雨条件下土壤淋溶作用造成的养分流失差异机理尚不清晰,并且对坡面磷素的流失特征也研究不足,尤其是关于坡面径流中主要的磷素流失形态以及泥沙携带对磷素流失的影响研究。今后应对不同雨强、不同坡度以及不同土地利用方式下的养分输移机理进行深入研究,增加更多情景下的农作物套种研究,明确不同土

地利用下壤中流对地表径流的影响,优化土地利用与覆盖方式。

2.1.2 流域尺度下的输移特征 小流域往往是一些河流的源头,许多学者通过典型小流域的污染物研究,分析流域内的污染物特征,为流域农业结构优化、土壤养分有效利用提供科学依据。周颖^[13]和张铁钢^[14]在丹汉江流域的典型小流域上研究发现,流域主要水质特点为高氮低磷,TN 流失最主要的形态为 NO_3^- -N,TP 流失以溶解态磷为主。总氮浓度在枯丰水期有明显差异,而总磷浓度无显著季节性差异,在林、草、农地 3 种主要的土地利用类型中,农地产流量和土壤侵蚀量大,非点源污染最为严重。刘泉^[15]在对石泉后沟小流域的研究中发现 7 月份降雨过程中径流氮浓度达到最大,而 9 月份降雨过程,径流氮浓度达到最低。园地、坡耕地、退耕地、果园 4 种土地利用类型的土壤侵蚀量的顺序为:园地 > 坡耕地 > 退耕地 > 果园,并且土壤流失量最大值均发生在 7 月份。这表明影响氮磷流失的主要因素是降雨类型以及土地利用类型,并且氮磷输出主要集中在径流前期,有着明显的初始冲刷效应。彭圆圆^[16]进一步通过坡面水土流失和养分流失过程的分析,构建出流域水土流失与养分流失之间的相应关系。回归方程如下:

$$\text{氮素流失量} = -0.985 + 2.871 \times \text{流域径流量} \quad (1)$$

$$\text{磷素流失量} = 0.093 + 0.016 \times \text{流域径流量} \quad (2)$$

目前研究者对水土-养分流失关系的分析大多仅从径流及泥沙的携带作用方面出发,忽视了壤中流及泥沙的影响。

为深入了解养分分布及组成特征,明晰土壤养分的分布特征和空间变异规律,成玉婷等^[17]与张军^[18]分析了丹江的径流污染物特征,发现植被覆盖度越高,养分流失量越小。丹江上游流域和下游流域植被覆盖较好,故流域养分主要在中游流域富集,并且发现植被覆盖与养分流失量可以很好地使用指数函数来反映,表达式为 $y = ae^{-bx}$ ($a, b > 0$)。张泽宇等^[19]对林地、农地、草地 3 种不同土地利用下全氮、铵态氮、硝态氮的空间分布特征等进行研究,认为草地对全氮与硝态氮储量的贡献最大,而农地对铵态氮储量的贡献最大。张铁钢等^[20]、贺敬滢等^[21]与王添等^[22],研究发现不同土地利用方式对土壤全磷、全氮和有效锌的空间异质性有较大影响,并且农耕地是氮和磷质量分数最大、有效锌变异系数最小的土地利用类型,在小流域农耕地土壤氮磷收支平衡中,土壤表观氮磷输入的主要来源是化

肥^[23]。因此农耕地的空间变异可能由随机性因素(施肥、作物管理水平等)和结构性因素(气候、地形等)共同引起。

综上所述,丹汉江流域非点源污染输移特征的研究,仍集中在典型小流域上,对于整个流域尺度的研究不多。尤其是关于丹汉江流域不同水平年以及洪水期与非洪水期 N、P 等典型污染物的流量特征和污染物特征尚不明晰,加上丹汉江流域存在严重水土流失,壤中流活跃,土壤中碎石含量较多,仍缺乏对于碎石含量以及壤中流对流域水土流失及养分流失的影响研究,并且除了研究不同区域养分含量分布特征之外,还应进一步对地表、地下径流进行分割,分析小流域降雨径流氮磷流失特征,明晰径流量、泥沙量与氮磷流失量的关系,建立适合当地侵蚀环境条件的氮、磷随地表径流和泥沙迁移模型。不断加强对丹汉江干流的水质特征监测和分析,将径流小区以及坡面尺度下获得的关于径流、土壤侵蚀和污染物迁移的研究成果向大流域尺度推广,明晰非点源污染源头及其输移机制,并与沿程小流域联系起来,科学、合理地布设水土保持工程和生态修复等措施。

2.2 非点源污染负荷估算

有效的非点源污染控制技术依赖科学的定量化计算,非点源污染负荷估算不仅可以预报流域污染负荷量及其对水体的影响,还为流域规划和管理提供决策支持。辛小康等^[24-25]采用数字滤波法对丹江口水库入库河流进行基流分割,并利用通量法计算非点源污染负荷,结果表明汉江是入库污染负荷的最大来源,COD_{mn}、TP 和 TN 占比分别达到了 79.3%、83.2% 和 65.31%。郗林^[26]与徐国策等^[27]在丹江和汉江流域中应用平均浓度法,得知非点源污染主要来源是坡耕地养分流失和农村生产生活污染物排放,非点源负荷量与降雨径流量有直接影响,平水年时,SS、COD 和 TP 分别占总负荷的 93%、41% 和 44%,枯水年和丰水年会出现相应的降低和增加,但是非点源污染负荷占总负荷中的比重始终在 70% 以上,总氮质量浓度明显超标。

由于非点源污染只有在降雨过程中形成径流才有可能发生,张春玲^[28]采用水质-水量相关法、水质-沙量相关法和平均浓度法预测丹汉江流域不同水平年的非点源污染年负荷量,3 种方法的预测结果基本接近,平水年非点源污染负荷量占比达到 80% 以上,丰水年此比例更高。洪小康等^[29]在汉江武侯镇将水质水量相关法与平均浓度法的预测结果

做近似对比,发现水质水量法预测结果偏小,这可能是由于流域数据资料欠缺,另外在监测期的典型流域次洪水量级偏小,不能完全说明非点源污染的实际情况,但考虑到降雨径流污染的复杂性,这种误差是在可以接受的范围之内。丹汉江流域水文站大多拥有较长序列的河流悬移质泥沙观测资料,李怀恩等^[30]提出的非点源营养负荷-泥沙关系法,通过流域输沙量预测非点源污染负荷量,在该流域具有重要的现实意义,该方法预测了白河断面不同水平年的非点源 TN 负荷量,并与水质水量相关法进行对照,二者计算结果非常接近。

输出系数模型所需参数少、操作便捷,简化了复杂的非点源污染形成过程,在中国得到广泛应用。输出系数模型的关键是确定合理的输出系数,确定方法有3种:实地监测、文献调研和数学统计分析。由于通过查阅文献获取的输出系数多为前人在特定条件下得出的结果,具有明显的区域特征和不确定性,孟令广等^[31]通过长期监测确定输出系数,利用输出系数法计算出2014年南水北调水源区的总氮、总磷年输出量分别为 13.53×10^4 和 0.63×10^4 t,其中畜禽养殖业对总氮年输出量的贡献率最高,农村生活对总磷年输出量的贡献率最高。李中原等^[32]分别采用输出系数法和分形理论对丹江口水库水源区2013年总氮(TN)、总磷(TP)的流失量进行估算,结果表明研究区污染物的流失以氮为主,两种方法计算结果无论是TN还是TP,相差不大。但是分形法以水系分维数来表征下垫面因素的影响,能更好地反映实际情况。

输出系数法是通过对土地利用组成与水质之间的关系进行分析,而偏最小二乘回归模型集多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析的基本功能于一体,能够在自变量存在严重相关性的条件下进行回归建模,不仅仅局限于对土地利用组成进行多角度划分。夏玲玉^[33]借助偏最小二乘回归模型定量分析汇水区景观背景特征变量对丹江口水库库湾水体氮磷浓度的影响,认为特征变量流域面积-高程积分和农业用地面积比在雨季时对库湾水体总氮、总磷浓度贡献最大,旱季时农业用地面积比贡献最大。艾蕾^[34]在堵河上游流域利用偏最小二乘回归方法建立流域景观格局与侵蚀产沙的定量耦合关系模型,认为土壤侵蚀、产沙和泥沙输移比与流域土地景观格局关系密切,土地景观格局分散性较强且斑块数目较多时,将加剧土壤侵蚀和泥沙输出。偏最小二乘回归模型有效克服了变量相关和共线性问

题,但是非点源污染机理复杂,来源模糊,其迁移转化过程涉及到化学、地理、水利等多个领域,偏最小二乘回归模型不能详细描述污染物来源、输移过程,以及景观格局特征和水文过程关系。非点源污染负荷研究的主要结论见表1。未来研究有必要进一步加入气象、土壤、地形等数据,加强对水文控制过程的认识。

2.3 非点源污染模型和模拟

非点源污染负荷量化研究是流域污染研究的基础工作,而负荷量难以通过调查统计手段获得,国内外研究者大多利用非点源污染负荷模型进行时空模拟,如:土壤侵蚀模型、水质模型、水文模型和有关污染模型来估算和模拟污染负荷^[35]。目前利用土壤侵蚀模型针对丹汉江流域的有关研究还相对较少,尤其是关于土壤养分损失量的研究^[36]。张铁钢^[14]利用RUSLE模型对鸚鵡沟流域的土壤侵蚀量进行计算,结果表明流域土壤侵蚀以微度侵蚀为主,年土壤侵蚀量为 2.25×10^6 kg。刘泉等^[37]利用陕南后沟小流域坡耕地2011-2012两年的降雨径流资料,评价了SCS-CN模型对该流域的适用性,并对径流曲线数和初损系数进行修正,建议 I_n 取值区间为0.1~0.4S,CN为58,径流量模拟值变化趋势与实测值基本一致,二者的相关分析均达到极显著相关($P < 0.01$)。

随着对成因分析和污染物质迁移机理的深入研究,大量学者在南水北调中线水源区研究中开始引用国外模型并加以修正,但是丹汉江流域此方面研究鲜见报导。佟文会^[38]利用AnnAGNPS模型分析了黑庙沟流域非点源污染时空分布特征,划分出了关键源区。结果表明泥沙主要集中在7-9月,总氮和总磷主要集中在4-10月份。8月份泥沙、总氮和总磷以及降雨量都达到峰值。泥沙、总氮、总磷负荷关键源区分别占流域面积的19%、21%和4.5%,占其总负荷的52.8%、54.7%、15.6%。乔卫芳^[39]通过SWAT模型模拟,发现丹江口水库流域非点源污染负荷时空差异明显,污染负荷与降雨量具有较强的相关性,多雨期的氮磷流失占全年一半以上。空间上污染负荷与土地利用方式关系密切。黄旭东^[40]利用SWAT模型探讨了堵河上游流域产沙对土地利用变化的响应并定量分析其耦合关系。结果表明流域土地利用组成和格局对特定的土壤侵蚀量的影响最大,解释了65.2%的特定产沙量的变化。子流域尺度下影响特定产沙的第1顺序因子为:耕地和林地面积比、斑块密度、香农多样性指数、

土壤可蚀性等。

目前,涉及丹汉江流域非点源污染物迁移转化研究的模型较少,且自主建立模型鲜见。大部分非点源污染模型都是在国外的环境中建立起来的,复杂的非点源污染模型需要庞大的数据支持,而丹汉江流域非点源污染研究时间短,缺乏系统监测,数据严重短缺,影响模型参数的率定,导致模型精确度难

以保证。

今后要不断加强基础数据监测,成立非点源污染基础信息数据库,建立具有非点源污染估算方法体系的污染物迁移转化模型,明确流域非点源污染的主要原因,研究径流过程中地表产流/产污、暴雨强度与径流污染强度之间的相关性,划分流域非点源污染关键源区。

表 1 非点源污染负荷估算研究结论

研究方法	作者	研究内容	结论
平均浓度法	郝林 ^[26]	丹江非点源污染物的平均浓度以及占比情况	(1)降雨径流对非点源负荷量有直接影响,枯水年和丰水年都会出现相应的减小和增加。 (2)在丹江水污染中,非点源污染占较大比重,其主要来源是坡耕地养分流失和农村生活污染物排放。
	徐国策等 ^[27]	鸚鵡沟流域的非点源污染负荷	
水质水量相关法	张春玲 ^[28]	丹汉江流域不同水平年的非点源污染年负荷量	(1)平水年非点源污染负荷量占比达到 80% 以上,丰水年此比例将会更高。
	洪小康等 ^[29]	汉江武侯镇断面非点源污染年负荷量	(2)降雨径流污染的复杂性与监测的典型流域次洪水量级偏小都可能造成预测结果偏低。
	李怀恩等 ^[30]	汉江白河断面不同水平年的非点源 TN 负荷量	(3)非点源营养负荷-泥沙关系法可在有限资料条件下估算流域非点源营养物年负荷量。
输出系数法	孟令广等 ^[31]	南水北调中线水源区非点源氮、磷污染负荷	(1)南水北调中线水源区总氮年输出量为 13.53×10^4 t, 总磷年输出量为 0.63×10^4 t。 (2)丹江口水库水源区污染物的流失以氮为主, TN 的流失量是 TP 的 7.16 倍。
	李中原等 ^[32]	丹江口水库水源区 2013 年总氮(TN),总磷(TP)的流失量	(3)输出系数法未考虑下垫面因素的影响将之平均化,分形法更能反映实际。
偏最小二乘回归模型	夏玲玉 ^[33]	量化景观背景特征变量对丹江口水库库湾水体氮磷浓度的影响	(1)特征变量农业用地面积比、流域面积-高程积分、香农多样性指数对水体总氮、总磷浓度以及土壤侵蚀、产沙和泥沙输移比影响较大大。
	艾蕾 ^[34]	堵河上游流域的土壤侵蚀、产沙和泥沙输移比与土地景观格局的耦合关系	(2)偏最小二乘回归模型有效克服了变量相关和共线性问题,但是不能详细描述污染物来源、输移过程,以及景观格局特征和水文过程关系。

3 非点源污染控制研究进展

流域非点源污染控制与管理是一个系统工程。对于非点源污染控制可分为 3 个部分,即源头治理、过程控制和末端转化。当地政府以及群众的参与对非点源污染控制手段也起着至关重要的作用,但是资金不足导致的经济劣势,已经造成当地政府和群众参与生态保护积极性的减弱,而建立生态补偿制度有助于化解区域相关者利益冲突,保障水源区的可持续发展。

3.1 源头治理

分析流域污染源是源头治理的前提,张强等^[41]以 COD 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为污染负荷指标,确定了汉江污染源主要为生活源和畜禽养殖污染源。王蕾等^[42]从整个流域层面对流域内不同污染源特征进行解析,结果同样证明了生活源和农业源是丹汉江流域的主要污染源。张军等^[43]对丹汉江流域非点源污染进行分区,敏感区等级以中心城市为核心,以干流为轴线,向南北两侧递减。“控源”就是控制 N、P 等污染物投入,房珊瑚^[44]研究发现水质中 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TP、

COD 年平均浓度与化肥负荷量显著相关,化肥施用与水质污染关系明显。张小勇^[45]针对不同施肥措施下的氮、磷养分流失特征研究,相对于当地农民的习惯施肥,优化施肥和部分有机肥替代施用可在一定程度上降低坡耕地氮、磷的流失风险,是较为适宜的施肥方式。然而目前对于此方面的研究仍属于以点代面的探索,今后应深入了解当地施肥习惯,科学计算化肥施用量,实行以产定肥,平衡施用有机肥、新型肥料以及无机肥。并加强农民环保意识教育和政府宣传力度,对农村零散的垃圾进行集中处理,严加管理河岸周边随意堆放的生活垃圾。

3.2 最佳管理措施

最佳管理措施(best management practices, BMPs)通过控制农业活动中污染负荷的产生和运移,防止污染物进入水体,是防治和减少非点源污染最有效的措施。佟文会^[38]设计了5种管理措施方案,结果显示退耕还林在削减径流量、泥沙、总氮和总磷负荷上效果最好。少耕对于泥沙的削减作用最明显,削减率达到75.45%。乔卫芳^[39]设计了数种减少化肥施用量和退耕还林的情景,结果同样表明退耕还林、还草措施对泥沙和非点源污染负荷有明显的控制作用,但是其对BMPs措施的效果评价及优选缺乏对成本效益的分析。王晓等^[46]进一步分析了投入成本及对农业生产的影响,并提出了不同坡度下的控制措施建议。大于5°的区域优先采用低成本措施,如:残茬覆盖、等高耕作、免耕等。5°~15°的区域以梯田措施为主进行治理,15°~25°的区域采用以植物篱措施为主,大于25°区域以退耕还林措施为主。

BMPs分为工程措施和非工程措施两大类型,未来对关键源区的污染控制规划应从非工程性和工程性措施两方面进行,对单一控制措施和多种组合控制措施效果进行定量模拟,调整种植结构,推行合理的轮作制度,采取田间轮作套种以增加地表覆盖,推广少耕或免耕法,鼓励土地流转,并减少暴雨前施肥、翻耕等农业活动,从而控制肥料及养分流失。

3.3 过程控制

土地利用是环境属性的综合反映,目前由于人类活动引起的土地利用变化,已成为丹汉江流域水质污染的主要因素^[47-49]。丹汉江流域的土地利用基本以草地、林地和耕地为主。该区域耕地少且分散,坡耕地面积大,是非点源污染的重要来源。研究表明丹江上游耕地面积比与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈极显著相关,与DO呈现显著负相关,林地比与 BOD_5 , COD_{Mn}

呈显著负相关^[50]。并且土地利用类型从耕地到森林或草地的转换亦将有效减少土壤有效磷含量^[51]。梯田能够有效地减缓养分的迁移,其土壤的养分含量变异系数整体小于坡耕地^[52]。李占斌^[7]通过模拟流域内15°~25°坡耕地进行坡改梯,小于25°的耕地退耕还林,全氮年流失量可减少537.7 t。贺敬滢^[53]提出对流域3°~8°、8°~15°、15°~25°以及大于25°的坡耕地分别进行坡改梯工程、修建坡式梯田、修建隔坡梯田以及退耕还林等配套的坡面整治措施,以进一步减缓非点源污染物和水土流失。孙虎等^[54]针对不同水平年时间变化特点、地形地貌条件和社会经济发展情况,将流域划分成低山和丘陵区、河谷平川区以及高山和中山区3个区,并建议采用营造生态林、坡改梯工程和生态自我修复为主的水土保持措施。目前刘少博等^[55]构建了适合该区域的水土保持生态服务价值评价体系,该工程在全部发挥效益后每年所产生的生态服务价值约为 543.561×10^8 元,是其年成本的130.51倍,生态经济效益非常显著。

丹汉江流域内多为经济欠发达地区,经济结构单一,水土保持治理投资资金不足。为防止水土流失和生态功能退化,应以小流域为单元,在流域内优化坡改梯工程、退耕还林、还草等生态修复措施,建立健全整个流域的水土保持体系。此外土地利用对非点源污染的影响不仅仅体现在不同土地利用类型上,不同的土地利用结构对非点源污染也有不同的影响。但是,目前对于丹汉江流域土地利用空间结构、耕作措施以及土地利用方式下非点源污染负荷定量研究较少。今后建议要进一步深入研究景观格局与水质之间的定量关系,利用景观格局指数来量化土地利用格局对土壤及养分流失的影响,综合考虑土地利用组成比例、贡献权重、空间配置变化和景观斑块的空间分布和分配对于水文循环和非点源污染的影响,通过坡面尺度的植被类型、格局和流域尺度土地利用调整相结合可以有效控制流域的氮、磷流失。

3.4 末端转化

末端转化是控制非点源污染的最后一道关口,包含植被过滤带、湿地缓冲区、滞留池、人工湿地等控制措施,贾海燕等^[56]发现河岸带100 m范围为流域总氮负荷输出的主要区域,有效控制100 m河岸带尺度的氮素流失,可显著降低流域总氮输出负荷。植被过滤带技术能有效地延缓初始径流的产生以及降低坡径流的峰值,增加坡面流的入渗截留径流中

的泥沙及氮、磷。段诚^[57]通过在丹江口库区的研究,发现各植被缓冲带中土壤的起始含水量与产流时间成线性负相关关系,并且对 SS、NH₄⁺-N、TP、SPR、NO₃⁻-N 和 TN 平均去除率分别达到 90.4%、77.4%、55.3%、41.1%、9.6% 和 16.9%。但是研究缺乏覆盖度、坡度和土壤类型等影响因子,并且没有关于植被根系特征和土壤污染物质含量的细致研究,今后应根据丹汉江流域植被特征开展典型物种的筛选试验,将研究分成室内和室外两部分,一方面结合流域实际,沿河岸优化植被缓冲带,并以此为基础在室内开展氮、磷拦截试验,研究阻控能力对各影响因子的响应。

由于丹汉江流域农村地域广阔,不能集中建设污水处理厂,因此投资小、操作简单的人工湿地是最佳控制措施。陈淑芬^[58]为削减坡耕地氮磷的排放,提出了多级渠塘-湿地组合生态处理系统,在对次降雨量 157 mm 的坡地径流处理中,氮磷等各指标出水均能满足《地表水环境质量标准》中的Ⅲ类水质标准,具有良好的社会、经济和环境效益。并且流域内人们为便于耕作,开垦了许多田间细沟,形成的沟渠网络能够分解坡面汇流,起到蓄水和保土的作用,这些生态沟对径流泥沙和土壤全磷的拦截作用也相当明显^[36]。然而,目前丹汉江流域对于农业非点源污染末端治理的重视程度不够,对沟渠系统中农田养分流失的机理和调控规律研究不足。并且控制措施零散单一,尚未对单一控制措施和多种组合控制措施效果进行定量研究,不能因地制宜形成全面的末端转化体系。

3.5 非点源污染控制的生态补偿

为保证南水北调中线工程的实施,丹汉江流域需要加大生态建设和水环境保护的投资,解决生态环境保护与追求经济发展的矛盾,基于此必须采取适当的措施对丹汉江流域进行合理的补偿。现行的生态补偿以政府为主导,但是各行政区间间的协调和统筹是丹汉江流域生态补偿的难点。为引入市场化补偿机制,朱九龙^[59-60]、周晨等^[61]分别通过生态系统服务价值法与区域生态保护总成本法对丹汉江流域生态补偿标准进行了测算,李国平等^[62]更是构建了一个将机会成本法与水资源价值法相结合的流域生态补偿标准计量模型,对市场化生态补偿实践提供了支持,但是仍缺乏对于丹汉江流域市场化生态补偿机制的多角度研究。李雪松等^[63]提出了水权交易、水源地发展权流转、生态经济、公共物品市场购买 4 种模式,进一步为相关实践提供有益参考。

丹汉江流域内迫切需要生态补偿来缓解经济发展的压力,然而所需要的横向管理机制尚不健全,并且缺乏明确的水权界定方案以及完善的交易机制。今后应加强市场化的辅助措施,明晰产权,构建水权交易市场,确定市场化生态补偿基础,并完善跨流域调水法律建设,因地制宜发展多种融资模式,研究分阶段、分区域、有步骤的控制和治理对策,提出切实可行的方案和路线图,为政府决策提供依据。

4 结论与展望

经过对丹汉江流域几十年的研究,初期的定性化研究已转向量化研究,径流小区监测已转向典型小流域非点源污染时空特征研究。但是该流域非点源污染污染来源广泛,污染过程和污染特征十分复杂,目前的研究尚存在一些不足,有待进一步完善。

(1)在现有的研究成果下,还需研究吸附结合在泥沙颗粒表面以无机态和有机质形式流失的养分和农作物吸收利用以及气体挥发等方面对地表径流及泥沙养分流失的影响。进一步研究不同土地利用与植被覆盖条件下典型小流域养分的输出特征和规律,考虑空间异质性和非点源污染特征的影响,结合径流小区、典型小流域的研究,将其推广到整个流域尺度。探明丹汉江流域非点源污染种类、污染源来源及污染负荷,将典型流域污染物输移的过程和机理联系起来,建立典型流域地表产流/产污与径流污染强度相关性模型,构建径流过程中典型污染物迁移转化数学模型,揭示丹汉江流域非点源污染迁移机理。

(2)丹汉江流域非点源污染已应用的模型中以统计模型、经验模型为主,迁移转化模型较少,且自主建立模型鲜见,研究成果零散,大多研究忽略了地形特征、土壤特征及气象条件等空间复杂性,使得一些在小尺度内获得的关于径流、土壤侵蚀和污染物迁移的研究成果难以向大流域尺度推广,并且模型模拟主要针对农业非点源污染物迁移转化的影响因素方面,多是通过降雨、土壤、土地利用、管理措施等单项因素进行研究来评估模型的不确定性,缺少复合条件下各因素的综合作用研究,尚未开展不同尺度措施的组合效果评估及优化配置模拟,应不断强化农业非点源污染不确定性模型的研究,建立具有非点源污染估算方法体系与污染物迁移转化过程的模型。

(3)目前丹汉江流域非点源污染控制与管理研究滞后,对于水土流失污染防控的试验研究多以小

区尺度的观测分析为主,缺乏流域尺度下污染防治措施的效应研究,且未能从源头、过程以及末端三个部分形成完整的非点源污染控制体系,管理和控制措施零散且不够深入。应结合具体区域特征和污染状况,建立流域土地、水域最优开发和管理模式。除此之外,更重要的是缺少健全的非点源污染防治法律制度和完善的管理体系。缺乏非点源污染管理控制的法律研究、政策研究和体制机制研究,横向管理机制不健全,区域生态补偿机制难以建立,需要加强研究分阶段、分区域、有步骤的控制和治理对策,构建水权交易市场,建立多种融资模式,提出切实可行的方案和路线图,为政府决策提供依据。

未来需要增加典型小流域监测数量、丰富降雨类型、研究人工模拟和自然降雨条件下的养分迁移过程,并与流域、坡面以及径流小区尺度下的养分输移过程有机结合。针对该流域农地较多,水土流失严重以及壤中流异常活跃等特点,加强水土流失以及壤中流对非点源污染形成和输移机理的影响研究。并结合水土流失模型开展非点源污染模拟及其预测预警研究,最终建立水土流失与面源污染一体化监测体系并推广应用。

逐步开展非点源污染基础数据的长期监测,建立非点源污染基础信息数据库。将大气污染研究与非点源污染调控有机结合,阐明大气中典型污染物的降水淋洗特征,研究不同季节、降雨条件及非降雨条件下大气中氮、磷、有机物等的迁移转化规律,及其与地表径流污染的相关性。并进一步优化研究方法,与模型选取,整合研究成果,解决模型开发、应用与理论研究存在脱节的问题,加强研究工作的连续性与不同研究团队之间的技术交流和数据共享,形成类似 SWAT 查找表一类的模型参数数据库,提高模型精度。

进一步确定景观格局与水质之间的定量关系,利用景观格局指数来量化土地利用对土壤及养分流失的影响,将坡面尺度的植被类型、格局和流域尺度土地利用调整相结合控制流域的氮、磷流失。因地制宜地采取工程措施和非工程措施,不断提高全民的生态保护意识,利用多种形式建立健全管护体系解决农村生活污水、垃圾处理等问题。

参考文献:

[1] SUN Xiaolei, HU Zhengyi, LI Meng, et al. Optimization of pollutant reduction system for controlling agricultural non-point-source pollution based on grey relational analysis com-

- bined with analytic hierarchy process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 370 - 380.
- [2] 郝改瑞,李家科,李怀恩,等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(12): 54 - 64.
- [3] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等. 汉江流域农业面源污染的源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2242 - 2251.
- [4] 孙佳乐,王颖,辛晋峰. 汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 80 - 86.
- [5] 李斌,解建仓,胡彦华,等. 近 50 年陕南地区降水时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 14 - 19 + 25.
- [6] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(06): 13 - 19.
- [7] 李占斌. 丹江江流域水土流失非点源污染过程与调控研究[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [8] 刘泉,李占斌,李鹏,等. 汉江水源区自然降雨过程下坡地壤中流对硝态氮流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 1 - 5 + 10.
- [9] 彭圆圆,李占斌,李鹏. 模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流氮素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 1 - 5.
- [10] 徐国策,李鹏,成玉婷,等. 模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流磷素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 6 - 10.
- [11] XU Guoce, CHENG Yuting, LI Peng, et al. Effects of natural rainfall on soil and nutrient erosion on sloping cropland in a small watershed of the Dan River, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 380: 327 - 333.
- [12] 刘泉,李占斌,李鹏,等. 模拟降雨条件下下坡地氮素流失特征试验分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 6 - 10.
- [13] 周颖. 丹江口库区流域面源污染输出规律与养分收支研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
- [14] 张铁钢. 丹江中游小流域水-沙-养分输移过程研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
- [15] 刘泉. 汉江中游小流域水土-养分流失过程与调控研究[D]. 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [16] 彭圆圆. 黄型小流域水土流失非点源污染过程初步研究——以鸚鵡沟为例[D]. 西安:西安理工大学, 2012.
- [17] 成玉婷,徐国策,李鹏,等. 丹江流域径流养分的空间变异特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 93 - 99.
- [18] 张军. 丹江流域植被格局演变及其与水质响应关系研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [19] 张泽宇,李占斌,李鹏,等. 汉江小流域土壤氮素空间分布特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 46 - 52 + 58.
- [20] 张铁钢,李占斌,刘晓君,等. 丹江鸚鵡沟小流域土壤全

- 磷空间分布及流失特征[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1):18-22.
- [21] 贺敬滢,张桐艳,李光录. 丹江流域土壤全氮空间变异特征及其影响因素——以陕南张地沟小流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(3):81-86.
- [22] 王添,任宗萍,张维,等. 丹江中游典型小流域土壤有效锌的空间分布特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):82-88.
- [23] 赵晓琳. 胡家山小流域农田土壤氮磷收支研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- [24] XIN Xiaokang, YIN Wei, LI Kefeng. Estimation of non-point source pollution loads with flux method in Danjiangkou Reservoir area, China[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(2):134-142.
- [25] 辛小康,徐建锋. 南水北调中线水源区总氮污染系统治理对策研究[J]. 人民长江, 2018, 49(15):7-12.
- [26] 郝林. 丹江干流污染物负荷总量初步估算[J]. 陕西水利, 2012(5):97-99.
- [27] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江鸚鵡沟小流域氮素随径流的迁移及对水质的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2):645-652.
- [28] 张春玲. 陕西省汉江、丹江非点源污染及控制对策[J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13(1):18-25.
- [29] 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, 16(4):384-386.
- [30] 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.
- [31] 孟令广,徐森,朱明远,等. 南水北调中线水源区氮磷面源污染负荷计算[J]. 人民长江, 2017, 48(20):10-15.
- [32] 李中原,王国重,左其亨,等. 应用分形理论估算丹江口水库水源区总氮、总磷的流失量[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):302-306.
- [33] 夏玲玉. 丹江口水库库湾水体氮磷对景观背景响应[D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
- [34] 艾蕾. 南水北调中线水源区典型流域土壤侵蚀与水环境特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [35] CHEN Lei, XU Jiajia, WANG Guobo, et al. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: Implications for physically based models[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562:1-16.
- [36] 徐国策. 丹汉江流域水-沙-养分输移过程及其调控机理[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [37] 刘泉,任三强,黄文军. 基于SCS-CN模型的陕南地区坡地径流预测[J]. 绵阳师范学院学报, 2016, 35(11):84-90.
- [38] 佟文会. 基于AnnAGNPS模型的丹江口库区黑庙沟流域非点源污染研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.
- [39] 乔卫芳. 丹江口水库流域(河南部分)农业非点源污染研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2011.
- [40] 黄旭东. 南水北调中线水源区堵河流域产流产沙对土地利用变化的响应[D]. 武汉:华中农业大学, 2016.
- [41] 张强,刘巍,杨霞,等. 汉江中下游流域污染负荷及水环境容量研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2):79-82.
- [42] 王蕾,关建玲,丁强,等. 南水北调中线陕西水源区污染源变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10):80-85.
- [43] 张军,李鹏,唐润芒,等. 陕西省丹汉江流域农业非点源污染区划[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):325-329.
- [44] 房珊瑚. 丹江口库区农用化肥非点源污染负荷及空间分布特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [45] 张小勇. 丹江口库区坡耕地玉米-小麦轮作制度下土壤氮、磷养分流失特征与主控因素研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [46] 王晓,郝芳华,张璇. 丹江口水库流域非点源污染的最佳管理措施优选[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7):1335-1343.
- [47] XU Guoce, LU Kexin, LI Zhanbin, et al. Impact of soil and water conservation on soil organic carbon content in a catchment of the middle Han River, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(8):6503-6510.
- [48] WU Haibing. Watershed prioritization in the upper Han River basin for soil and water conservation in the South-to-North Water Transfer Project (middle route) of China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(3):2231-2238.
- [49] 章影. 丹江口库区土地利用与土壤侵蚀变化及其关系研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉植物园), 2016.
- [50] 王杰,李鹏,高海东,等. 丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):383-389.
- [51] LI Zhanbin, LI Peng, XU Guoce. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. Catena, 2013, 101:17-23.
- [52] 黄萍萍,李占斌,徐国策,等. 基于田块尺度的丹江上游坡改梯土壤养分空间变异性研究[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3):307-313.
- [53] 贺敬滢. 土地利用与景观部位对土壤磷分布的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [54] 孙虎,王继夏. 汉江流域水土流失类型区划分及分布规律[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(5):879-882.
- [55] 刘少博,陈南祥,郝仕龙,等. 丹江口库区及上游水土保持生态服务价值评价[J]. 人民黄河, 2018, 40(2):88-92.
- [56] 贾海燕,徐建锋,李海燕,等. 农业小流域土地利用格局变化对氮素输出的影响——以丹江口库区胡家山小流域为例[J]. 人民长江, 2019, 50(2):24-29+34.

- [17] 罗燕,田永丽,戴敏,等. 云南近50年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版),2015,37(6):870-877.
- [18] 姚愚,晏红明. 云南1月降水异常的气候成因分析[J]. 气象,2018,44(12):1583-1592.
- [19] 谷勇,陈芳,李昆,等. 云南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复[N]. 科技导报,2009,27(5):75-80.
- [20] 王宇,彭淑惠,杨双兰. 云南岩溶区As、Cd元素异常特征[J]. 中国岩溶,2012,31(4):377-381.
- [21] 宁晓菊,张丽君,杨群涛,等. 1951年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报,2015,70(11):1811-1822.
- [22] 丁文荣,曾学梅. 云南岩溶区降水变化的气候特征[J]. 水资源与水工程学报,2019,39(1):7-12.
- [23] 郭湘宇,吴正方,杜海波,等. 福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 资源科学,2017,39(6):1084-1098.
- [24] 胡建桥,王亮明,刘辉,等. 1961-2016年西宁市极端降水事件变化特征[J]. 水利水电技术,2018,49(8):101-107.
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [26] 李玮,段利民,刘廷玺,等. 1961-2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. 资源科学,2017,39(11):2153-2165.
- [27] 陈学凯,徐建新,胡娟萍,等. 1961-2012年贵州省极端降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):50-56+61.
- [28] 时光训,刘健,马力,等. 1970-2014年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文,2017,37(4):77-85.
- [29] 郑建萌,张万诚,陈艳,等. 2009-2010年云南特大干旱的气候特征及成因[J]. 气象科学,2015,35(4):488-496.
- [30] 吴兴国. 云南岩溶区的石漠化和综合治理[J]. 绿色科技,2014(11):34-35.
- [31] 程建刚,王学锋,范立张,等. 近50年来云南气候带的变化特征[J]. 地理科学进展,2009,28(1):18-24.
- [32] FAN Hui, HU Jinming, HE Daming. Trends in precipitation over the low latitude highlands of Yunnan, China [J]. Geographical Sciences, 2013, 23(6):1107-1122.

(上接第27页)

- [57] 段诚. 典型库岸植被缓冲带对陆源污染物阻控能力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [58] 陈淑芬. 多级渠塘-湿地复合生态处理系统削减坡地排水中氮磷负荷研究[D]. 北京:中国地质大学,2014.
- [59] 朱九龙. 南水北调中线工程水源区生态补偿优先系数研究[J]. 水电能源科学,2017,35(7):113-116+100.
- [60] 朱九龙. 南水北调中线水源区生态补偿标准与资金分配方式[J]. 水电能源科学,2017,35(4):157-160.
- [61] 周晨,丁晓辉,李国平,等. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角[J]. 资源科学,2015,37(4):792-804.
- [62] 李国平,王奕洪,张文彬. 南水北调中线工程生态补偿标准研究[J]. 资源科学,2015,37(10):1902-1911.
- [63] 李雪松,李婷婷. 南水北调中线工程水源区市场化生态补偿机制研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(S1):66-72.