黑河水库非点源污染时空分布研究

张晓晗，万 甜，程 文，王 兰，任杰辉

（西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地，陕西 西安 710048）

摘 要：[目的] 对黑河水库上游流域进行非点源污染模拟与分析，为水库水环境质量改善提供科学支撑。[方法] 采用非点源污染—SWAT 模型对流域内水文站 2002—2008 年的实测降雨、逐月径流以及泥沙及水质数据进行率定与验证，并对流域的非点源污染进行分析。[结果] ①非点源污染的产出主要集中在汛期(6—10 月)且与降雨成正相关关系；②流域内降雨量分布从南向北、从山区向平原递减，径流深与降雨量成正相关，泥沙、非点源负荷的空间分布与降雨量相反；③不同土地利用类型单位面积的非点源污染产出不同，耕地最大，草地次之，林地最小；④面积耕地减少，污染负荷显著减少，耕地转换为林地的效果优于耕地转换为灌木林，退耕还林还草可有效减少流域内非点源污染负荷。[结论] 黑河水库非点源污染主要发生在下游汛期 6—10 月，退耕还林、减少施肥可有效控制区域非点源污染。

关键词：黑河水库；SWAT 模型；非点源污染

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0324-07 **中图分类号**：X522

文献参数：张晓晗，万甜，程文，等. 黑河水库非点源污染时空分布研究[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：324-330. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.051. Zhang Xiaohan, Wan Tian, Cheng Wen, et al. Temporal-spatial distribution of non-point source pollution research of Heihe Reservoir[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 324-330.

Temporal-spatial Distribution of Non-point Source Pollution Research of Heihe Reservoir

ZHANG Xiaohan, WAN Tian, CHENG Wen, WANG Lan, REN Jiehui

(*State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: [Objective] The SWAT model was used to simulate and analyze non-point source pollution in the Heihe upper reservoir in order to provide scientific support for the improvement of water quality of the reservoir. [Methods] The non-point source pollution—SWAT model was used to determine and verify the measured rainfall, monthly runoff, sediment and water quality data of the hydrological stations in the basin from 2002 to 2008. [Results] ① The output of non-point source pollution mainly concentrated in the flood season(June—October) and was positively correlated with rainfall. ② The rainfall within the river basin distributed unevenly and it decreased from the south to the north, from mountain to plain. The runoff depth was positively correlated with rainfall, and the spatial distributions of sediment and non-point source loads were opposite to rainfall. ③ The output of non-point source pollution per unit area varied with land use types. The cultivated land had the largest output, followed by the grassland, and woodland had the least. ④ In different simulation scenarios, the pollution load decreased significantly as the cultivated land decreased. In the aspect of non-point pollution control, forest land converted from cultivated land performed better than the cultivated land and woody forest from cultivated land. The conversion of farmland to forest and grassland could effectively reduce the non-point source pollution load in the basin. [Conclusion] The non-point source pollution of Heihe Reservoir occurred mainly in the downstream flood season from June to October. Returning land from farm to forestry, and reducing fertilization, could effectively control non-point source pollution in the region.

Keywords: **Heihe Reservoir; SWAT model; non-point source pollution**

收稿日期：2017-12-19 **修回日期**：2018-01-23

资助项目：陕西省水利科技计划项目“渭河陕西段水环境特征及水质演变过程分析”(2016slkj-10)

第一作者：张晓晗(1994—)，女(汉族)，陕西省大荔县人，硕士研究生，研究方向为水污染控制。E-mail：1341114987@qq.com。

通讯作者：万甜(1984—)，女(汉族)，湖北省天门市人，博士学位，讲师，主要从事水污染控制原理与技术方面的研究。E-mail：wantian@xaut.edu.cn。

随着社会、经济的快速发展,人类活动的日益增加,中国水环境污染愈加严重,严重威胁人类的身体健康。水环境污染分为点源污染和非点源污染(面源污染)[1],其中通过污水管网直接进入水体的污染物即点源污染,近几年来已得到有效控制;除此之外其他一切污染物形式均属于非点源污染,因其具有广泛性、随机性、滞后性等特点[2,3],使得非点源污染更难以控制。研究表明,在一些流域内,非点源污染已经超过点源污染,成为导致水环境质量下降的主要原因,非点源污染越来越受到重视,越来越多的国家开始关心非点源污染在水质恶化中所扮演的角色。关于非点源污染,国内外学者试图利用数学模型研究这一问题。从 1966 年出现的 STANFORD 流域规划水文模型到美国农业部开发的 CREAMS 模型以及由 CREAMS 模型演变出 GLEAMS 模型以及 EPIC 模型等奠定了非点源污染模型的 3 大模块:水文、侵蚀以及污染物迁移,随着计算机技术、遥感技术和地理信息系统的突飞猛进,非点源模型功能日益强大,模型向人工智能、可视化等方向发展,其中包括 SWMM 模型[4]、L-THIA 模型[5]、AnnAGNPS 模型[6]、SWAT 模型[7]等。王蓉等[4]利用 SWMM 模型模拟快速城市化地区的暴雨径流过程和非点源污染负荷,对该流域后续非点源污染控制提供依据;李凯等[5]利用 L-THIA 模型模拟番禺市桥河流域的非点源氮磷负荷量,在资料较为匮乏的情况下取得了满意的成果;李家科等[6]利用 AnnAGNPS 模型对黑河流域的非点源进行污染模拟,表明该模型在西北半干旱地区典型流域的长期模拟具有良好的适用性;秦耀民等[7]利用 SWAT 模型探讨了黑河流域不同土地利用与非点源污染的关系,研究土地变化对黑河流域非点源污染影响的变化过程。目前应用最广泛、最具代表性、前景最广阔的是 SWAT 模型,是因为其源代码公开,方便模型的二次开发。近几年来,SWAT 模型应用到我国黑河流域、沣河流域、汾河流域和渭河流域[8-12]等在内的很多流域,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。黑河水库作为西安市最重要的地表水源地,为该市 300 万市民提供饮用水。西安地区黑河供水系统的建设,一定程度上缓解了西安市中心的水荒问题,但西安市的供水前景不容乐观。黑河水库水源处于秦岭北麓深山区,居民以农耕业为主,农耕活动是非点源污染的主要来源。为此。本研究以黑河水库控制的上游区域作为研究区域,在空间数据与属性数据的支撑下,构建 SWAT 模型,分析研究区域的径流深、泥沙、营养物质(氮、磷)的时空分布特征,并且设置不同的土地利用情景,为黑河水库水质的改善提供初步的污染控制措施建议。

1　研究区概况

黑河水库位于陕西省西安市周至县境内(34°02′—34°03′ N,108°12′—108°11′ E),水库流域总面积为 1 481 km^2,总库容 2.0×10^8 m^3,日均供水能力 7.60×10^9 t,是目前西安市最主要的地表水水源。黑河水库上游流域位于秦岭北麓,属暖温带半干旱、半湿润大陆性季风气候区,四季分明,多年平均气温为 13.2 ℃,流域径流形成主要依靠降雨,整体趋势是由南向北递减,多年平均降水量为 674.3 mm,降雨集中在 6—10 月,占全年降水量的 67.4%～78.2%,流域内山高坡陡,水土极易流失,污染源包括土壤侵蚀、流失污染等。

2　数据来源及研究方法

2.1　数据来源及方法

SWAT 模型成功运行源于基础数据库的构建,包括空间数据和气象数据。空间数据包括数字高程图(DEM)、土地利用图、土壤类型图[12];另一类是属性数据,包括气象数据、水文数据、水质数据、土壤数据、土地管理数据、点源污染负荷[13]。表 1 为模型数据库所用的空间数据和属性数据。

表 1　模型所需的空间数据及属性数据

类型	名称	数据格式	数据概述	数据来源
空间数据	DEM 图	Grid	分辨率为 30 m×30 m	地理空间数据(http://www.gscloud.cn/)
	土地利用图	Shape	1∶100 000 的土地利用图	中国科学院
	土壤类型图	Shape	1∶1 000 000 的土壤类型图	寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)
属性数据	气象数据	DBF	日降雨量、最高和最低气温、风速和相对湿度	水文气象站
	水文数据、水质数据	DBF	2002—2008 年黑河水文站日均流量、逐日含沙量以及氮、磷含量	黑河水库水文站
	土壤数据	DBF	土壤物理性质、土壤化学性质	中国土壤数据库(http://www.soil.csdb.cn/)
	土地管理数据	DBF	作物生育期、施肥等	地方统计资料、年鉴
	点源污染负荷	DBF	点源排放口位置、污染物负荷	地方统计资料、污染源调查

2.2 子流域及水文响应单元的划分

子流域的划分是 SWAT 模拟的第一步，对模拟结果有重要影响。基于 DEM 对流域水系进行提取，随后设定河道阈值面积和流域出口，进行子流域的划分。本研究在划分子流域时，采用模型推荐的阈值，将划分阈值定为 3 000 hm^2，黑河水库作为流域总出口位于 1# 子区域，将研究区共划分为 31 个子区域。图 1 为黑河流域子区域划分图，依据子流域输出报表，将土地利用阈值和土壤类型阈值、坡度阈值分别设定为 5%，5%，5%，据此将流域上游共划分为 633 个水文响应单元(HRUs)。

2.3 模型率定和验证

分析黑河水库的水文、水质数据，其中 2002—2008 年为黑河水库代表水文年，2003 年为丰水年，2008 年为平水年，2006 年为枯水年；利用流域内 2002—2008 年实测的黑峪口水文站的径流、泥沙、总氮和总磷资料，对 SWAT 模型进行参数率定和验证，以 2002—2005 年作为率定期，2006—2008 年作为验证期。首先对模型进行敏感性分析，采用 LH-OAT 敏感性分析的方法选择最敏感参数，敏感性分析结束后对 2002—2005 年模型参数进行率定，率定结束后对 2006—2008 年模型参数进行验证。采用模型中 SCU-UA 算法对模拟值和实测值进行率定和验证，当率定和验证期模拟值和实测值的相对误差 $r<20\%$，相关系数 $R^2>0.6$，效率系数 NS>0.5，说明两者吻合较好，满足要求。表 2 为 SWAT 模型径流、泥沙和总氮、总磷率定和验证结果，验证结果表明，虽然模拟值与实测值存在一定的误差，但整体拟合良好，对黑河水库上游流域具有较好的适用性。

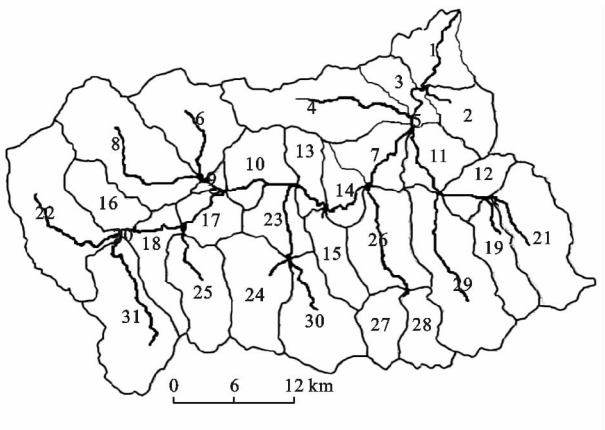


图 1 黑河流域子流域划分

表 2 SWAT 模型径流、泥沙和总氮、总磷率定和验证结果

模拟期	径流			泥沙			总磷			总氮		
	r/%	R^2	NS	r/%	R^2	NS	r/%	R^2	NS	r/%	R^2	NS
率定期	17.74	0.74	0.75	−8.90	0.72	0.81	−7.75	0.64	0.69	17.38	0.69	0.69
验证期	2.90	0.70	0.68	−17.3	0.73	0.75	12.04	0.71	0.77	−11.82	0.67	0.76

注：r，R^2，NS 分别为相对误差、相关系数和效率系数。

3 非点源污染负荷时空分布特征

3.1 非点源污染时间分布特征

利用 SWAT 模型，以黑河流域 2002—2008 年监测的降雨量作为基础资料，分析年际降雨量和年内降雨量与泥沙、非点源污染物质产出时间分布特征。图 2 为 2002—2008 年年降雨量、泥沙、总氮、总磷变化趋势图。由图 2 可知：①流域内年降雨量 551.8～1 014.3 mm，平均值为 775.0 mm，年际变化大，并且大部分降雨集中在汛期 6—10 月，汛期降雨量占到全年的 75%；泥沙量 19 620～158 200 t，平均值为 64 070 t，汛期泥沙量占到全年的 74.23%；流域内总氮量 12 429～104 193 kg，平均值为 36 753 kg，汛期总氮量占全年的 72.58%；流域内总磷量 12 637～95 160 kg，平均值为 34 282 kg，汛期总磷量占全年的 69.15%；②泥沙和非点源物质的产出与降雨量的时间分布趋势具有一致性，降雨量大，污染负荷量大，降雨量小，污染负荷量也小；流域年际降水变化较大，降雨量最大与最小比值为 1.83，流域内泥沙、总氮、总磷产出随降雨量也发生变化，泥沙、总氮、总磷最大与最小比值分别为 8.06，8.38，7.53；③污染负荷的产出与降雨量年内分配变化一致，比较 2003 与 2005 年污染负荷，2003 与 2005 年的降雨量差别不大，分别为 1 014.3，976 mm，2003 年为 2005 年的 1.04 倍，2003 年与 2005 年泥沙量分别为 158 200，91 770 t，总氮量分别为 104 193，52 480 kg，总磷量分别为 95 160，40 386 kg，比较可知 2003 年的泥沙量和非点源负荷要远大于 2005 年，比值分别为 1.72，1.99 和 2.36，这是因为 2003 年降雨主要集中在 8—9 月，年内降雨量分布差别较大，2005 年年内降雨量分布较为均匀，可见降雨量的时间分布会对污染负荷的产出有很大的影响；④由于土壤侵蚀一般发生在降雨期间，径流与泥沙携带总氮、总磷污染物负荷，年内降雨量分配不均匀，3 月出现第一个峰点，对应流域内的春汛，降雨

主要集中在汛期 6—10 月,泥沙、氮磷负荷也是集中在汛期,汛期产量占年产量分别为 74.23%,72.58%和 69.15%,与年内统计量一致。降雨影响非点源污染负荷的产出,主要因为降雨—径流是模型水文循环的重要部分,污染物氮磷大部分是随降雨、泥沙过程产生,主要集中在降雨量大的部分,汛期会发生大型暴雨,暴雨产生的地表径流和输沙过程,会携带大量的污染负荷,形成主要的非点源污染;此外,相关研究表明,模型对径流大的区域模型效果会更好,当降雨量很小,径流产出小,模型不会输出非点源污染负荷。

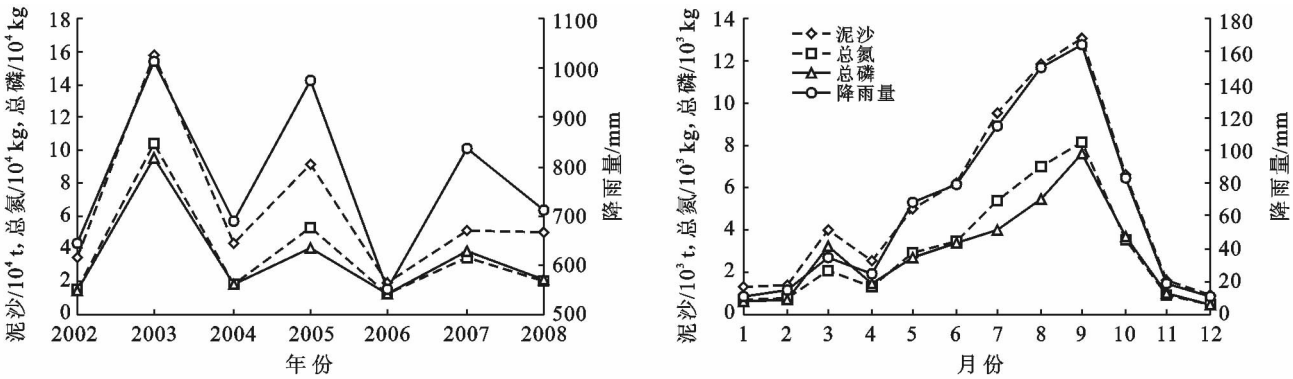


图 2　黑河流域 2000—2008 年降雨量、泥沙、总氮、总磷变化趋势

3.2　非点源污染空间分布特征

非点源污染负荷的空间分布性与研究区域的降雨量、土地利用、土壤利用以及地形有关,通过与 GIS 结合,可以表达出空间上非点源的分布特性。根据流域内 2002—2008 年降雨分布特征,筛选每个子流域内的降雨量,利用 ArcGIS 进行插值,得到年降雨量空间分布情况(图 3)。流域内各子流域年降雨量在 531 mm 以上,最高的区域高达 752.3 mm,整体趋势是由南向北(山区区域向平原区域)递减,水库下游流域降雨量最低,上游流域降雨量最高,说明降雨量与下垫面、地形以及人类活动密切相关。下游受人类活动影响,主要为裸岩和灌木,植被覆盖率低,生态环境较差,蒸发量小,空气湿度小,降雨量小;上游流域几乎无人类活动,山地植被覆盖率高,以林地为主,蒸发量大,降雨量也大。在流域范围内,采用黑峪口水文站年径流数据进行 SWAT 径流模拟,得到年均径流深空间分布图(图 3)。

流域内年均径流深在 182.27～406.36 mm,整体趋势是由南向北递减,降雨是径流形成的首要环节,降雨量大的区域径流深也相应增大,降雨量小的区域径流深也相应减小,降雨与径流深呈现一定正相关关系。上游流域降雨量及坡度大,故径流深也大;下游区域(1,2,3,5)径流深增加,主要是因为支流王家河、陈家河的汇入增大了干流流量,加上下游区域受人类活动影响较大,多为荒地,蒸发量小,形成径流深较大从而使得下游区域径流深增加;上游流域径流深略小于下游流域,不仅与降雨量有关,而且与下垫面等自然地理因素相关,上游多为林地,蒸发量大;土壤为棕壤性土与粗骨土,降雨易形成下渗,因此上游流域径流深略小于下游流域。

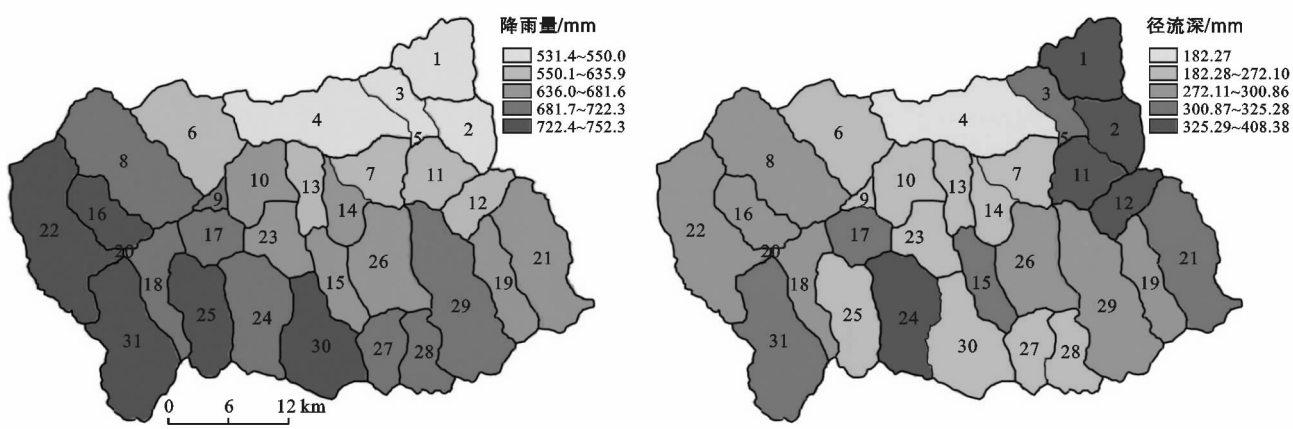


图 3　黑河流域年均降雨量、径流深分布

泥沙不仅是重要的非点源污染物质，而且也是氮磷输出的重要载体，根据水文年鉴及其参考资料，黑河泥沙含量一般较少，年际和年内变化较大，河水多年平均含沙量为 0.387 kg/m^3；SWAT 模型河道中泥沙主要来自 HRUs 和河道中的冲刷，根据每个子流域的泥沙负荷，利用 ArcGIS 工具空间插值，得到年均泥沙负荷分布图(图 4)。流域内单位泥沙负荷差别较大，最高的子流域高达 2.48 t/hm^2，最低的子流域为 0.11 t/hm^2。泥沙分布是从南向北(高山区向平原区)递增，泥沙分布不仅与降雨量相关，也与其下垫面条件相关，中、高山区，植被覆盖率高，生态环境良好，林地与草地植物的叶、枝、茎可消减降雨动能，截留降雨量，植物根系可提高土壤抗冲刷能力，加之枯枝落叶形成的腐殖质有截沙作用，虽然区域坡度较高，但单位泥沙负荷较小；下游区域，随高度递减，植被覆盖率也呈递减趋势，泥沙的侵蚀也逐渐加深，主要是因为下游是耕地区域，且下游林地受人类活动影响，出现裸岩和草本灌木为主的荒土地，加大了侵蚀，从区域对应行政区域看，泥沙的产出主要集中在下游的双庙子乡、王家河乡和陈河乡。

根据图 4 中的流域年均有机氮、有机磷负荷分布图可知，有机氮、有机磷最小负荷均为 0.011 kg/hm^2，有机氮最大为 0.637 kg/hm^2，有机磷负荷最大为 1.341 kg/hm^2，非点源负荷的输出与泥沙具有很高的一致性，从南向北(高山向平原区)递增，主要是因为泥沙携带营养物质，附着在土壤上的有机氮、有机磷以及无机磷通过地表径流迁移到河道，使非点源污染负荷集中在下游区域。上游为厚畛子镇，位于高山区，林地覆盖率高达 70%，此处非点源负荷背景值较高，非点源负荷有一定输出但比较小；中游分布着国有林和集体林，由于存在着过量砍伐，导致森林面积日趋减少，出现裸岩和以草本灌木为主的荒土地，且土壤是棕壤性土与粗骨土，该类土壤跑水跑肥易水土流失，故比上游区域非点源负荷有一定程度的增加；下游区域坡度平缓，植被覆盖度低，受到居民的影响，开发强度大，耕地多分布在此区域，坡耕地水土流失剧烈，土壤中的氮、磷随水土流失进入河道，是流域内受到生态破坏最为严重的区域，且流域土壤表层粒径大部分分布在黏粒粒径的范围内，土壤中的有机氮、有机磷主要吸附在在黏粒上，加大了有机氮、磷的输出。有机磷负荷比有机氮负荷大，是因为流域内磷背景值较大，为 12.44～18.08 mg/kg，有机氮负荷为 6.20～10.34 mg/kg，且流域内磷肥使用量大于氮肥使用量。

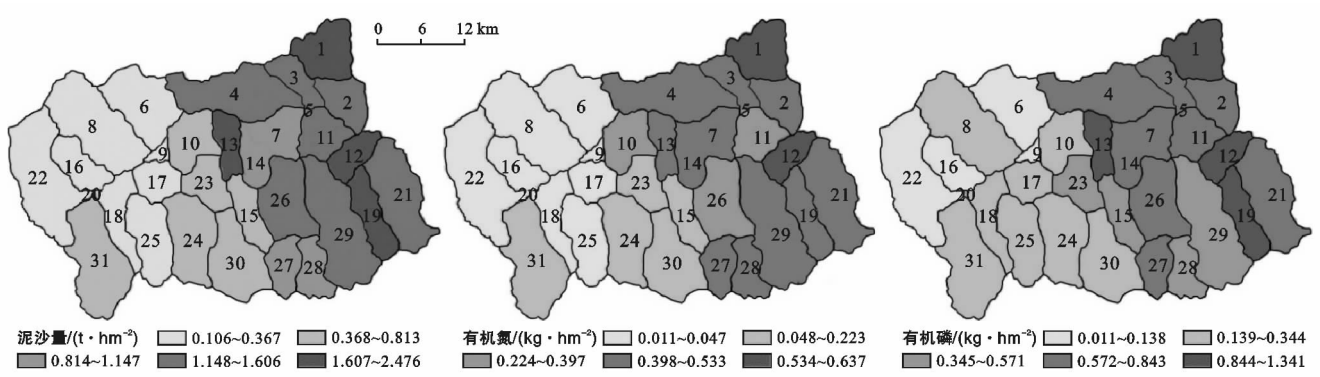


图 4 黑河流域年均泥沙、有机氮、有机磷负荷分布

3.3 不同土地利用下非点源污染状况

泥沙、有机氮、有机磷的产出与土地利用类型密切相关，而不同的土地利用类型又与土壤类型和坡度分布有关[14]，统计出黑河流域不同土地利用类型下年污染贡献量，结果详见表 3。

由表 3 可知。不同土地利用类型单位面积的非点源污染产出率不同。单位面积泥沙产量顺序依次为：耕地＞农村居民点＞中覆盖度草地＞灌木林＞高覆盖度草地＞林地，泥沙负荷最大为耕地 1.53 t/hm^2，最小为林地 0.26 t/hm^2；单位面积有机氮产量顺序依次为：耕地＞农村居民点＞中覆盖度草地＞高覆盖度草地＞灌木林＞林地，有机氮负荷最大为耕地 0.61 kg/h，最小为林地 0.04 kg/h；单位面积有机磷产量顺序依次为：耕地＞农村居民点＞高覆盖度草地＞中覆盖度草地＞灌木林＞林地，有机磷负荷最大为耕地 1.16 kg/h，最小为林地 0.09 kg/h。研究表明[14-15]，耕地面积与污染负荷成正相关，耕地面积增大，单位面积污染负荷也增加，耕地面积减小，单位面积污染负荷也减小。这是因为耕地受人类农业活动和施肥影响，耕地施肥引起的污染是非点源污染的主要来源；黑河流域地广人稀，主要依靠“广种薄收”，为提高农作物产量，大量施用化肥，部分未利用化肥随径流迁移，部分渗入土壤，随时间流逝，耕地区的氮磷负荷不断增高。

表 3　黑河流域不同土地利用类型年污染贡献量

土地利用类型	面积/km²	比例/%	泥沙			有机氮			有机磷		
			单位面积负荷/(t·hm⁻²)	年均总负荷/10³ t	贡献率/%	单位面积负荷/(kg·h⁻¹)	年均总负荷/kg	贡献率/%	单位面积负荷/(kg·h⁻¹)	年均总负荷/kg	贡献率/%
耕地	96.41	6.51	1.53	14.69	22.93	0.61	5 377.68	33.38	1.13	7 586.37	23.55
林地	765.08	51.66	0.26	19.92	31.09	0.04	3 065.00	19.03	0.09	6 896.25	21.40
灌木林	215.34	14.54	0.47	10.10	15.77	0.06	1 290.24	8.01	0.24	5 160.96	16.02
高覆盖度草地	210.89	14.24	0.39	8.21	12.82	0.14	2 948.82	18.31	0.32	6 740.16	20.92
中覆盖度草地	190.16	12.84	0.57	10.82	16.90	0.17	3 228.64	20.04	0.29	5 507.68	17.09
农村居民点	3.11	0.21	0.98	0.31	0.48	0.56	191.54	1.19	0.79	54.82	1.10
合计	1 481	100	—	64.07	100	—	16 109.04	100	—	33 218.10	100

3.4　非点源污染控制情景模拟

黑河水库上游流域的非点源污染主要来自耕地和林地,林地单位面积污染负荷居于最末,但面积最大,占流域的 51.66%,所以年均总负荷也大;耕地虽然占比较小,但单位面积负荷和年均总负荷均居于首位,因此,控制来自耕地的非点源污染物,是减少流域内非点源污染总量的最可行和有效途径。为响应国家水源地保护政策,实行“退耕还林”、“退耕还草”的政策,设置如下两种情景,与基准境况对比(在实际调研中发现,流域内约有 20% 的耕地适合退耕还林、还草。模拟过程中,将此部分耕地类型进行了适当调整)。

①情景 1。林地单位面积的有机氮、有机磷污染负荷最小,将坡度≥15°的下游耕地面积分别减少与增加 20%,设置为林地,其他土地利用面积保持不变;②情景 2:高覆盖草地,中覆盖草地、灌木林单位面积污染负荷差别不大,灌木林单位面积污染负荷相对较小,将坡度≥15°的下游耕地面积分别减少与增加 20%,设置为灌木林,其他土地利用面积不变。由表 4 可知,流域内耕地主要位于下游区域与沿河岸区域,把土地利用由耕地设置为林地和灌木林,可以显著改变流域污染物负荷的产出,植被覆盖度增加,可以显著减少泥沙、有机氮、有机磷的产出,植被覆盖度减少,泥沙、非点源污染负荷显著增加。耕地在同样减少 20%的情况下,情景 1 污染负荷输出小于情景 2 污染负荷输出,因林地其郁闭度高,林地枯落物及地面的草本植物可截留降水、增加地表粗糙度削减产沙,而灌木林为高度 2 m 以下的矮林地和灌丛林地,比较而言,林地产生径流较小,径流携带泥沙少,相应的氮磷污染负荷产出也减少。余新晓等[17]研究蔡家川流域降水及林分因子对坡地降雨产流产沙的影响,刺槐和油松林场降雨产流、产沙量与降雨量和降雨强度有较好的相关性,但相关性随着林分郁闭度的增大而减小,这与本研究结论一致。

表 4　黑河流域情景 1 和情景 2 下污染负荷年均总量与变化率

不同情景	项目	基准情景	情景 1(耕地减少 20%)		情景 1(耕地增加 20%)	
			总量	变化率	总量	变化率
情景 1	泥沙/10³ t	64.07	51.64	−19.40	78.42	22.39
	有机氮/kg	16 109.04	13 256.47	−17.71	19 168.79	19.00
	有机磷/kg	33 218.09	26 666.65	−17.24	38 786.32	20.39
情景 2	泥沙/10³ t	64.07	54.33	−15.21	80.02	24.89
	有机氮/kg	16 109.04	13 999.51	−13.10	20 068.71	25.00
	有机磷/kg	33 218.09	27 562.09	−14.45	39 015.22	21.09

4　结论

(1) 非点源污染与降雨量呈正相关关系,降雨量增加,泥沙、非点源的产出也增大,非点源污染年内的产出主要在集中在汛期(6—10 月),泥沙、氮磷的产出分别占到全年的 74.23%,72.58%,69.15%;降雨量越大,地表径流相应增大,携带的泥沙量也越大,随着大量水流和泥沙,必然同时携带着大量的非点源污染物,这符合非点源污染物的产生规律:非点源污染是伴随降雨径流过程产生的。

(2) 流域内降雨量分布是从南向北、从山区向平原区递减;径流深分布与降雨量呈正相关,上游区域降雨量及坡度大,径流深也较大,下游区域,受人类影响,多为荒地,蒸发量小,再加上支流的汇入,径流深增加;泥沙分布是从高山区向平原区递增,是降雨与下垫面共同作用下的结果,上游生态环境好,泥沙侵蚀小,下游受人类活动影响,侵蚀较严重,侵蚀较严重的行政区域是双庙子乡、陈河乡和王家河乡;总氮、总磷的空间分布与泥沙具有很高的一致性,主要是因为氮磷负荷随泥沙迁移。

(3) 不同土地利用类型单位面积的非点源污染产出率不尽相同。单位面积泥沙产量顺序依次为:耕地>农村居民点>中覆盖度草地>灌木林>高覆盖度草地>林地,单位面积有机氮产量顺序依次为:耕地>农村居民点>中覆盖度草地>高覆盖度草地>灌木林>林地,单位面积有机磷产量顺序依次为:耕地>农村居民点>高覆盖度草地>中覆盖度草地>灌木林>林地。耕地面积与污染负荷成正相关,由耕地施肥引起的污染是非点源污染的主要来源。

(4) 设置两种不同的情景模式,耕地减少,污染负荷显著减少,耕地增加,污染负荷明显增加;耕地转换为林地,效果优于耕地转换为灌木林;在黑河水库内实行"退耕还林"、"退耕还草"的政策,可以显著改变流域污染物负荷的产出。

[参 考 文 献]

[1] 杨立梦,高红涛. 国内外非点源污染模型研究进展[J]. 资源节约与环保,2016,23(5):151-155.

[2] 向霄,钟玲盈,王鲁梅. 非点源污染模型研究进展[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2013,31(2):53-60.

[3] 陈媛,郭秀锐,程水源,等. 基于SWAT模型的三峡库区流域污染物来源分析及重点控制区域识别[J]. 北京工业大学学报,2013,39(5):761-768.

[4] 王蓉,秦华鹏,赵智杰. 基于SWMM模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2015,51(1):141-150.

[5] 李凯,曾凡棠,房怀阳,等. 基于L-THIA模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析[J]. 环境科学,2013,34(11):4218-4225.

[6] 李家科,李怀恩,李亚桥,等. 基于Ann AGNPS模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J],水土保持学报,2008,22(6):81-88.

[7] 秦耀民,胥彦玲,李怀恩. 基于SWAT模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. 环境科学学报,2009,29(2):440-448.

[8] 杨寅群,李怀恩,杨方社. 基于数学模型的陕西黑河流域水源区植被过滤带效果评价[J]. 水科学进展,2013,24(1):42-48.

[9] 李家科,杨静媛,李怀恩,等. 基于SWAT模型的陕西沣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.

[10] 李丹,冯民权,白继中,等. 基于SWAT模型的汾河运城段非点源污染模拟与研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(11):111-117.

[11] 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.

[12] Valentina K, Jeffrey G A. Advances in ecohydrological modelling with SWAT: A review[J]. Hydrological Science Journal, 2008,53(5):939-947.

[13] 李家科,李怀恩,沈冰,等. 渭河干流典型断面非点源污染监测与负荷估算[J]. 水科学进展,2011,22(6):819-829.

[14] L. Chiang I. Chaubey M, Gitau W, et al. Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a CEAP watershed using SWAT model [J]. Transactions of the ASABE, 2010,53(5):1569-1548.

[15] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modeling of the united states with the soil and water assessment tool[J]. Water Resouces Development, 2008,14(3):315-325.

[16] 余新晓,张晓明,吴思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流是侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2006,24(1):19-25.