

基于输出系数模型的呼兰河流域 非点源污染输出风险分析

张立坤^{1,2}, 香宝^{1,2*}, 胡钰^{1,2,3}, 方广玲^{1,2}, 金霞^{1,2,4}, 马广文⁵

(1.中国环境科学研究院, 北京 100012; 2.国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 3.北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4.内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022; 5.中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要:非点源污染控制是实现流域水质改善的重要途径,通过风险评估识别重点污染区域并进行分区管理是流域非点源污染治理的最有效手段。以呼兰河流域为研究对象,收集国内外文献输出系数,利用随机模拟的方法,结合GIS技术估算了流域非点源污染输出风险。结果表明,呼兰河流域非点源污染发生率较高,氮平均输出风险达到40.48%,磷平均输出风险达到17.11%,氮为流域内主要非点源污染物质。流域的非点源污染呈现支流重于干流的现状。结合县级行政区划对估算结果进行分析发现,望奎县污染最为严重,绥化市和海伦市次之,庆安县与绥棱县相对风险较小。根据输出风险估算结果,对呼兰河流域进行管理分区,解析得到30.27%的区域属于高风险区,7.27%的区域属于极高风险区,非点源污染对流域的潜在威胁较大,有必要对高风险区域进行优先控制,并对不同等级的风险区制定相应管理措施,为流域非点源控制以及水质改善提供理论支持。

关键词:呼兰河流域;输出系数;非点源污染;风险分析

中图分类号:X820.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)01-0148-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.01.019

Risk Assessment of Non-point Source Pollution in Hulan River Basin Using an Output Coefficient Model

ZHANG Li-kun^{1,2}, XIANG Bao^{1,2*}, HU Yu^{1,2,3}, FANG Guang-ling^{1,2}, JIN Xia^{1,2,4}, MA Guang-wen⁵

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Beijing 100012, China; 3.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4.College of Geographical Science of Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 5.China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract:Reducing non-point source pollution is an important way to improve water quality of a river basin. Identifying priority areas through risk assessment and implementing partitioned managements would effectively control non-point source pollution. In this paper, the risk of nitrogen and phosphorus to Hulan River Basin was estimated using the random simulation method and GIS technology based on their output coefficients collected from the literatures. In the Hulan River Basin, N was the major pollutant, the incidence for N and P risks was 40.48% and 17.11%, respectively. Wangkui county had the most serious pollution, followed by Suihua and Hailun, and the least risk in Qing'an and Suiling. Non-point pollution was more serious in the tributaries than the mainstream. Based on the risk assessments, Hulan River Basin was divided into five management regions. The high-risk region accounted for 38.54% of the total watershed area, indicating high risk of non-point source pollution in the Hulan River Basin. These results would provide useful information for controlling non-point pollution and improving water quality in the Hulan River Basin.

Keywords: Hulan River Basin; output coefficient; non-point source pollution; risk assessment

收稿日期:2013-05-30

基金项目:国家环保公益性行业科研专项(201209032)

作者简介:张立坤(1988—),女,北京人,硕士研究生,主要从事面源污染防治研究。E-mail:zhanglikun07@163.com

*通信作者:香宝 E-mail:xiangbao@craes.org.cn

非点源污染的概念是相对于点源污染提出的,与点源污染相比,其具有产生过程随机、污染途径不确定、分布范围广泛、形成机理复杂等特性,这些特性增大了非点源污染的研究与控制难度^[1-2]。近年来,我国逐渐意识到开展非点源污染治理对于改善水体质量、控制水体富营养化具有不可替代的重要性,先后在太湖流域和长江流域等地区开展了大量研究^[3-5],在非点源污染区域监测、空间模拟与负荷估算等方面取得了突破性的成果。与这些区域相比较,东北地区气候寒冷,河流冰封期长,且监测资料匮乏,非点源污染的研究基础较薄弱,深度和广度都需要进一步加强。

基于对非点源污染的广泛监测和机理过程的深入研究,模型模拟逐步成为非点源污染的主要探究手段之一。其中,输出系数模型数据需求量小、简便易行,被广泛应用于大尺度流域范围上的非点源污染研究。20世纪70年代,美国和加拿大在对土地利用与湖泊富营养化的关系研究中首先提出了输出系数法的概念^[6];Jones等^[7]全面考虑土地利用类型、种植作物种类以及畜禽、人口等因素的影响,进一步完善了输出系数模型;Wickham等^[8-9]基于输出系数法,通过随机模拟的方式开展了非点源污染的输出风险分析与评价。刘瑞民等^[10]估算了大辽河流域的非点源污染输出风险,并将其与坡度和行政区划相联系进行深入分析;田甜等^[11]从行政区划角度通过时间和空间的对比,分析了三峡库区大宁河流域的非点源污染输出风险,并验证了土地利用类型与输出风险之间的关系。本文以输出系数模型为基础,使用随机模拟法模拟呼兰河流域的输出系数,并估算分析其输出风险,进而提出分区管理措施,为呼兰河流域的非点源污染治理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

呼兰河流域位于东经125°55'~128°43',北纬45°52'~48°03'之间,干流全长523 km,流域总面积36 630.8 km²,是松花江左岸最大的支流。流域发源于小兴安岭西侧的炉吹山,地形东北高、西南低,流经松嫩平原东部的13个市县,从哈尔滨东北部汇入松花江。呼兰河流域降雨充足,多年平均降水量约575 mm,年径流总量达到了4.6×10⁹ m³,水土流失情况严重。流域内种植面积广阔,是黑龙江省的主要粮食产地之一,农业氮磷输出量大,非点源污染已成为流域水体的主要污染源之一。呼兰河流域具体位置和水系组成见图1。

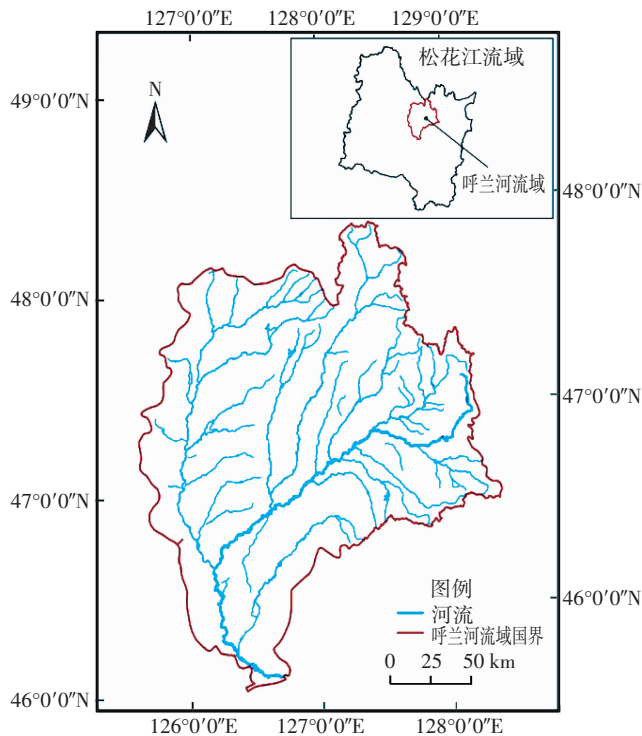


图1 呼兰河地理位置及主要水系图

Figure 1 Location and water systems of Hulan River Basin

1.2 输出风险模型

输出风险模型^[8-9]是基于输出系数法,根据土地利用类型分布特征进行非点源污染输出风险评估的一种模型,其公式的一般表达形式为:

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

$$P_j = \frac{L_j - E_h}{L_j} \quad (2)$$

式中: j 表示污染物种类,本研究中为N、P; i 表示流域内土地利用类型,本研究中分为耕地、林地、草地、城镇; L_j 表示污染物 j 在流域内带权重的平均输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹; E_{ij} 表示污染物 j 在流域内第 i 种土地利用类型中的输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹,根据输出系数的统计分布形态随机模拟生成; A_i 表示第 i 种土地利用类型的面积,km²;A表示流域总面积,km²;P_j表示污染物 j 的输出风险概率; E_h 表示林地的最大输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹。

1.3 输出系数确定

刘瑞民、田甜等^[10-11]使用美国的研究数据验证了耕地、林地、草地和城镇的输出系数呈现对数正态分布统计形态。在此基础上,本研究使用查阅文献法,收集与研究区自然特点类似区域的输出系数^[12-26](表1),得到其在对数正态分布下的统计值,利用统计数据开

表 1 国内输出系数基础统计
Table 1 Empirical data of output coefficients

类型	指标	数量	国内输出系数经验数据/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹		
			最小值	中值	最大值
耕地	N	17	17.43	29.00	33.29
	P	14	0.25	0.75	0.90
林地	N	16	1.90	2.38	7.75
	P	13	0.02	0.15	0.71
草地	N	12	6.00	10.00	16.04
	P	10	0.18	0.20	0.20
城镇	N	12	5.50	11.00	16.00
	P	10	0.16	0.30	0.50

展区域非点源输出风险评估与分析研究,降低了地域差异对研究结果的影响。

为验证输出系数选取的合理性,将得到的统计值与流域已有的相关研究进行比对。考虑到呼兰河流域的非点源污染研究成果较少,比对数据不足,将参考范围拓展到松花江流域。呼兰河流域隶属于松花江流域,两者在水文、气候、地理位置、植被覆盖等多因素上较接近,选取松花江流域的输出系数作为比对标准是合理的。参考马广文等^[27]、王秀娟等^[28]在松花江流域开展的研究,选取其文献值作为标准值进行比对,如表 2 所示。结果表明,两者差异不显著,所选输出系数与呼兰河流域的实际情况相符。

1.4 数据获取及处理

根据呼兰河流域实际地形地貌特征,应用 2008 年 1:50 000 数字高程数据,将呼兰河流域划分为 42 个子流域。结合 2008 年区域土地利用图,得到子流域土地利用面积比。使用表 1 和表 2 的统计数据随机生成 10 000 个符合对数正态分布的输出系数,以子流域土地利用面积比为权重,根据公式(1)计算子流域平均输出系数。考虑到林地植被覆盖率高,对地表径流有拦截缓冲作用,在没有人类干扰的情况下本身不会产生非点源污染输出风险,因此以林地的最大输出系数作为输出风险的阈值。根据公式(2)计算子流域平均输出系数超出林地最大输出系数的概率,即子流

域不同污染物(氮、磷)的输出风险概率。其具体流程如图 2 所示。

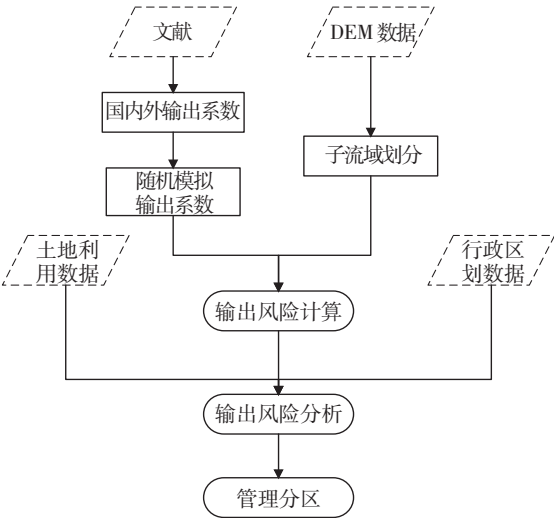


图 2 研究流程示意图

Figure 2 Flow diagram of pollutant risk assessment

2 结果与讨论

2.1 非点源污染输出风险分布特征分析

根据计算结果,以风险概率 0.1 为间隔划分等级区间,将呼兰河流域非点源污染输出风险划分为 10 个等级,其等级与非点源污染的发生概率相对应,等级越高非点源污染发生的可能性越大。分级结果如图 3、图 4 所示。

呼兰河流域东北地区部分小流域完全被林地覆盖,输出风险计算结果均小于林地的最大输出系数这一阈值,低于阈值即认为没有风险,同时考虑到林地作为非点源污染的“汇”,在没有人类干扰的情况下本身不会产生非点源污染输出风险,因此将此部分子流域的输出风险确定为 0。分析不同风险等级的子流域分布,发现呼兰河流域的非点源污染输出风险主要有以下 3 个特征:

(1)非点源污染情况严重,氮、磷输出风险差异显著。在流域内 40.51%的区域中,氮输出风险超过 0.5,甚至部分区域风险概率超过了 0.9,非点源污染情况

表 2 对数正态分布下的均值和方差

Table 2 Means and variances of pollutants converted by log-normal distributions

统计值	N				P			
	耕地	林地	草地	城镇	耕地	林地	草地	城镇
均值	1.416 3	0.376 6	1.016 9	0.993 7	-0.053 6	-0.948 9	-0.527 4	-0.542 9
方差	0.022	0.009	0.018	0.028	0.024	0.196	0.054	0.154
文献标准值	1.462 3	0.380 2	1.000 0	1.041 4	-0.045 8	-0.699 0	-0.699 0	-0.699 0

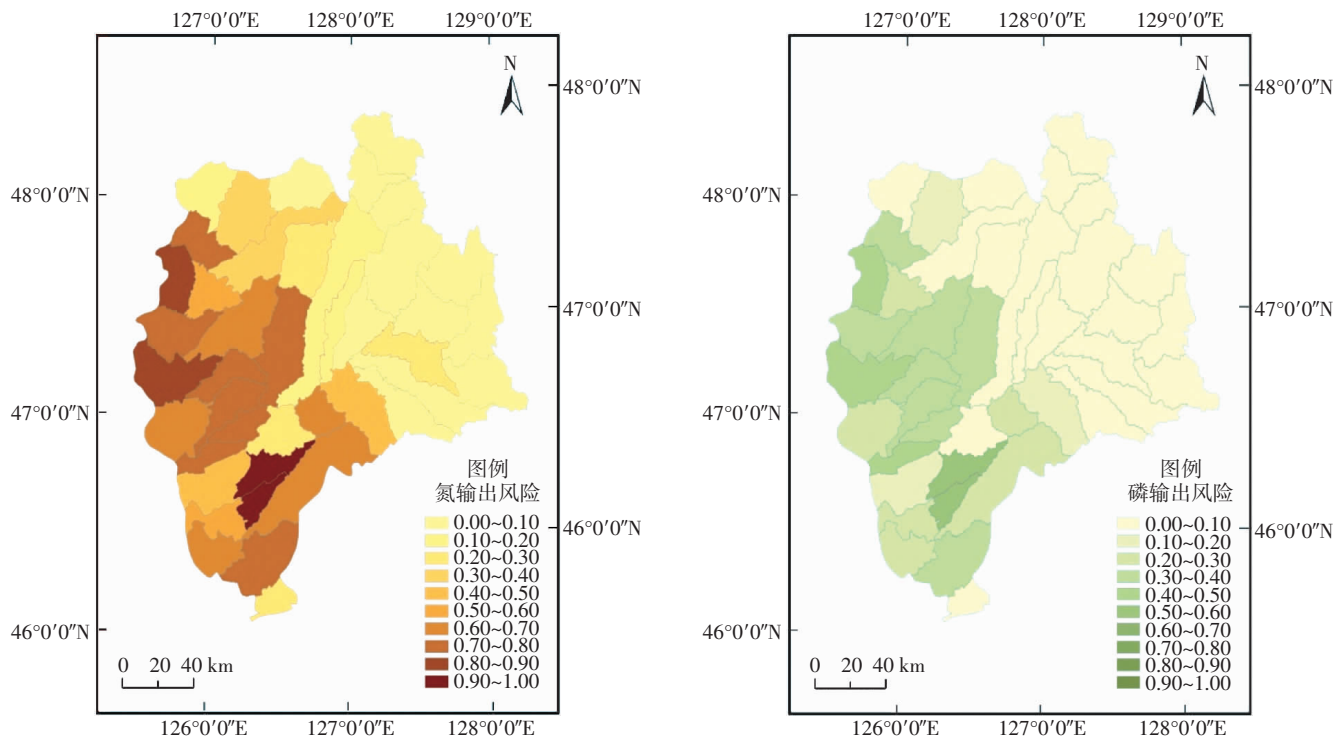


图3 呼兰河流域非点源污染输出风险概率

Figure 3 Risk distribution of non-point source pollution in Hulan River Basin

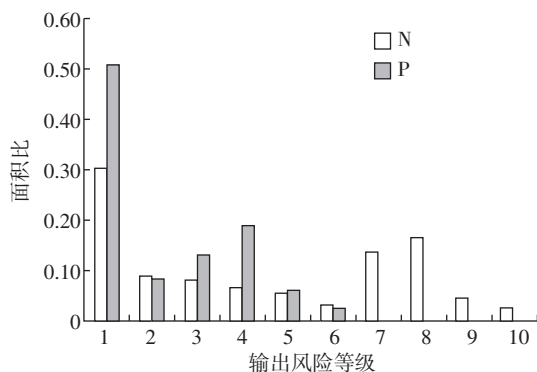


图4 呼兰河流域输出风险空间分布特征

Figure 4 Spatial distribution of non-point pollution risk in Hulan River Basin

较严重。此外,流域非点源污染主要类型为氮污染,其平均输出风险值达到 40.48%,而磷对于呼兰河流域非点源污染的贡献率远远低于氮,平均输出风险仅为 17.11%,且在超过 97% 的区域内磷的输出风险均未超出 0.5,两者有显著性差异。

(2)非点源污染输出风险的阈值范围较大,从东北至西南呈现阶梯递增趋势。流域内氮的最小输出风险仅为 0%,而最大输出风险达到了 98.18%,发生非点源污染的可能性超出最小值近 1 倍。磷的输出风险

阈值上限与下限的差异也达到了 54.76%。由图 3 可以看出,氮、磷的低风险区域主要集中在流域东北部,高风险区域集中在西南部,与呼兰河流域东北高山、西南平原的地形相吻合,加之流域东北地区被森林覆盖,西南地区则多耕地与城镇,造成了非点源污染输出风险从东北至西南递增的空间分布特征。

(3)支流非点源污染的输出风险重于干流。呼兰河干流流域的氮输出风险在 10%~50%之间,而其支流海伦河、扎克河、克音河则大多在 70%~100%之间,污染情况明显重于干流。呼兰河流域土质优良、肥力较高、日照时间长、雨量充沛,因此耕地面积分布广泛且以西南小支流为重点分布区域。支流水流量较小,对种植业非点源污染的容纳能力较差,造成呼兰河流域支流的非点源污染重于干流的现状。

2.2 基于行政区划的非点源污染输出风险分析

根据 1:100 万县级行政区划图,呼兰河流域内完整的县级行政区域包含绥棱县、海伦市、庆安县、绥化市、望奎县。建立均风险的概念对行政区输出风险进行评价分析。均风险是指在由不同输出风险模块组成的区域内,不同风险等级占有的面积比与风险概率的乘积和。计算绥棱县等 5 个县级行政区域的均风险,结果如图 5 所示。

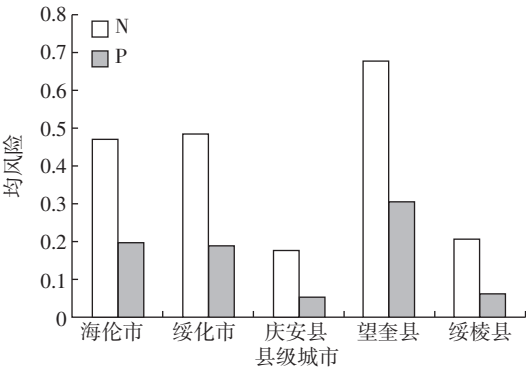


图 5 呼兰河流域不同区县的均风险

Figure 5 Average risk of different regions in Hulan River Basin

不同区县的氮、磷均风险变化趋势相同,但是水平差异明显。其中,望奎县均风险最大,氮均风险概率达到了 67.54%,磷均风险概率达到了 30.65%,非点源控制治理迫在眉睫;绥化市和海伦市仅次于望奎县,氮均风险概率接近 50%。相比之下,绥棱县和庆安县的氮均风险概率分别为 20.66%和 17.50%,相对处于非点源污染发生可能性小的区域。总体上看,5 个县级行政区中有 3 个发生非点源污染的可能性较大,其余两个也存在一定的风险,急需建立非点源污染的合理控制方案与削减技术来有效降低输出风险。

2.3 非点源污染管理分区方案

为了有针对性的对呼兰河流域非点源污染进行控制治理,将呼兰河流域划分为五级管理区域(图 6),分别制定管理方案,以期能够合理有效地使用不同手段削减流域非点源污染,改善流域水质。由于流域非点源污染以氮污染为主,以氮的输出风险为依据进行管理区划分(表 3)。

轻微风险区:输出风险在 0.00~0.20 之间,主要分布在呼兰河流域东北部的上游区域,39.23%的流域面积在此范围内。土地利用类型以有林地和灌木林地为主,植被覆盖率高,人为活动稀少,自然生态环境良好,非点源污染轻微,需要重点保护。因此,管理措施以保护为主,防止生境破坏,利用法律、行政手段,划

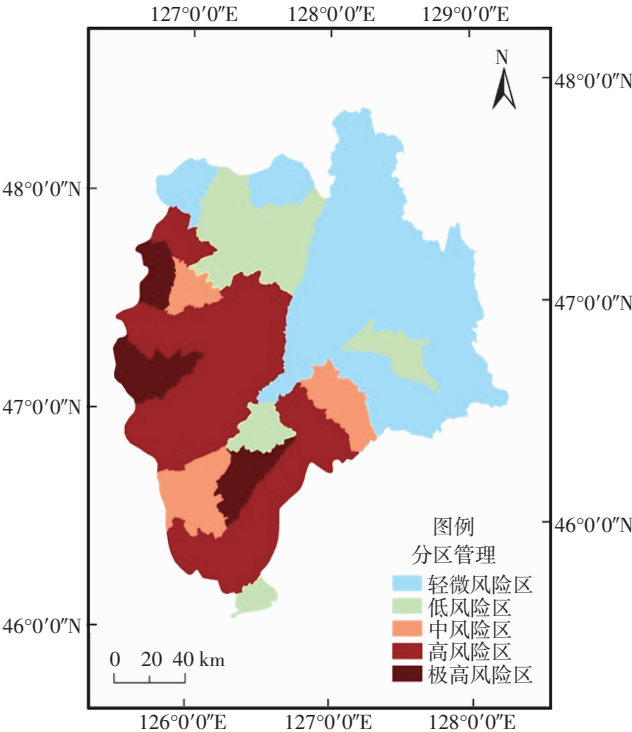


图 6 呼兰河流域管理分区

Figure 6 Risk zoning of non-point pollution in Hulan River Basin

定保护区,建成防护林带,增加呼兰河流域的水源涵养能力,达到控制非点源污染维持在较低风险范围内的目标。

低风险区:输出风险在 0.20~0.40 之间,在呼兰河流域的分布较散乱,但大部分与轻微风险区接壤,占流域面积的 14.82%。土地利用多呈现从林地向耕地过度的混合类型,以农业非点源污染为主体,有一定程度上的污染排放,但对区域水质的影响不显著。考虑到采取人为控制措施可能会对现有生境造成一定程度的破坏,导致污染进一步扩大,在此区域内仍以采用保护措施为主,同时控制重点污染源的输出,避免非点源污染情况的恶化。

中风险区:输出风险在 0.40~0.60 之间,多分布在呼兰河干流以及二级河流周边,区域水体纳污能力较

表 3 呼兰河流域非点源污染分区管理措施

Table 3 Management measures of different risk zones in Hulan River Basin

管理分区	输出风险	面积比率/%	管理措施	预警颜色
轻微风险区	0.00~0.20	39.23	划定保护区,采取保护措施	蓝色
低风险区	0.20~0.40	14.82	以保护措施为主,同时控制重点污染源	绿色
中风险区	0.40~0.60	8.41	控制农业非点源,推广低污染种植模式	橙色
高风险区	0.60~0.80	30.27	控制污染源,并构建工程措施削减污染	红色
极高风险区	0.80~1.00	7.27	退耕还林,生态修复	深红色

强,占流域面积的8.41%。土地利用类型以耕地、城镇为主,非点源污染较严重,属于污染较可能发生区域,保护措施已经不能满足非点源污染的控制,需要采取管理措施从源头控制污染的输出。农药、化肥的过量施用、配比不当以及利用率低等都是造成农业非点源污染的重要原因,针对呼兰河流域的主要粮食作物玉米和大豆,推广低容量、超低量喷雾法以及静电喷雾法等喷洒技术,采取平均施肥、缓控释肥等方法从投入品的角度降低风险。此外,低污染种植模式的推广也是源头控制的重点管理措施之一,采用保护性耕作、等高耕作、条状种植、保护性轮作等方式进行农田非点源污染的源头控制。

高风险区:输出风险在0.60~0.80之间,分布在呼兰河流域西部以及南部的下游区域,占流域面积的30.27%,非点源污染情况严重,属于污染高发区域,仅靠源头控制已不能有效削减非点源污染,需配合一定的工程措施来完善,达到降低非点源输出风险的目标。构建梯田、植草水道等对减少泥沙随地表径流冲刷而带来的非点源污染有明显成效;水体岸边缓冲带、草地化径流带、等高缓冲带能够有效拦截氮、磷,同时增加植被覆盖率,减少土壤侵蚀。此外,泥沙滞留、人工湿地等工程措施也对非点源污染控制有重要作用。

极高风险区:输出风险在0.80~1.00之间,分布在五级河流三道沟子、七道河等周边,占流域面积的7.27%,污染负荷极其严重,区域非点源污染治理迫在眉睫,在实施源头控制和工程治理的基础上,对已遭到破坏的环境进行生态修复。改善土地利用类型的空间分布,增加自然斑块和廊道,提高区域自然环境的自我调节能力和稳定性,合理规划退耕还林,长期平稳地使区域生态环境、区域水质得到恢复。

3 结论

(1)呼兰河流域非点源污染较严重,氮、磷输出风险差异显著,流域非点源污染主要来源于氮。非点源污染从东北至西南递增,氮的高低阈值相差1倍,输出风险随土地利用类型变化剧烈。

(2)支流周围城镇、耕地较多,加之自净能力差,输出风险普遍重于干流,其中以海伦河、扎克河、克音河子流域污染最为严重。

(3)总体上看,流域内5个行政区县均存在不同程度的非点源输出风险,需要进行非点源污染控制。其中望奎县、绥化市和绥棱县输出风险较高,应作为

重点治理区域,尽快开展非点源污染的合理控制与削减治理。

(4)以流域氮输出风险为依据,将呼兰河流域划分为轻微风险区、低风险区、中风险区、高风险区以及极高风险区5个级别,分别依据不同区域的特点制定了管理措施,为呼兰河流域的非点源污染控制治理提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 王宗明, 张 柏, 宋开山, 等. 农业非点源污染国内外研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9):468-472.
WANG Zong-ming, ZHANG Bo, SONG Kai-shan, et al. Domestic and overseas advances of non-point source pollution studies[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9):468-472.
- [2] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5):87-91.
HE Chan-sheng, FU Bo-jie, CHEN Li-ding, et al. Non-point source pollution control and management[J]. *Environmental Science*, 1998, 19(5):87-91.
- [3] 乔卫芳, 牛海鹏, 赵同谦. 基于 SWAT 模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2):219-225.
QIAO Wei-fang, NIU Hai-peng, ZHAO Tong-qian. Temporal-Spatial distribution of agricultural non-point source pollution in the Dan-jiangkou Reservoir watershed based on SWAT model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(2):219-225.
- [4] 乔 飞, 孟 伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染负荷核算及来源分析[J]. 环境科学研究, 2013, 23(1):81-87.
QIAO Fei, MENG Wei, ZHENG Bing-hui, et al. Pollutant accounting and source analyses in the Yangtze River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 23(1):81-87.
- [5] 高 伟, 周 丰, 郭怀成, 等. 滇池流域高分辨率氮、磷排放清单[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1):240-250.
GAO Wei, ZHOU Feng, GUO Huai-cheng, et al. High-resolution nitrogen and phosphorus emission inventories of Lake Dianchi Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1):240-250.
- [6] Reckhow K H, Simpson J J. A procedure using modeling and error analysis for prediction of lake phosphorus concentration from land use information[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37:1439-1448.
- [7] 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, 183:323-349.
- [8] Wickham J D, Riitters K H, O' Neill R V, et al. Land cover as a framework for assessing risk of water pollution[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(6):1417-1422.
- [9] Wickham J D, Wade T G. Watershed level risk assessment of nitrogen and phosphorus export[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37(1-3):15-24.

- [10] 刘瑞民, 何孟常, 王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 663-667.
LIU Rui-min, HE Meng-chang, WANG Xiu-juan. Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in upper reach of Daliao River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 663-667.
- [11] 田 甜, 刘瑞民, 王秀娟, 等. 三峡库区大宁河流域非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 185-190.
TIAN Tian, LIU Rui-min, WANG Xiu-juan, et al. Risk assessment of nitrogen and phosphorus export in Daning River of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(6): 185-190.
- [12] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 473-477.
SHI Zhi-hua, CAI Chong-fa, DING Shu-wen, et al. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4): 473-477.
- [13] 李怀恩, 庄永涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(4): 307-312.
LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao. The export coefficient modeling approach for load prediction of nutrient from non-point source and its application[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2003, 19(4): 307-312.
- [14] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民. 长江上游非点源氮素负荷时空变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 836-841.
DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min. Temporal-spatial changes of non-point source nitrogen in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 836-841.
- [15] Jennifer G W. Export coefficient modeling and bioassessment in two tributaries of the Grand River[J]. *Southern Ontario: University of Waterloo*, 1998, 20: 41-47.
- [16] 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 Rui-min, SHEN Zhen-yao, DING Xiao-wen, 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.
- [17] 李 根, 毛 峰. 我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J]. 中国水土保持, 2008, 2: 9-11.
LI Gen, MAO Feng. Soil and water conservation in China[J]. *SWCC*, 2008, 2: 9-11.
- [18] 杨淑静, 张爱平, 杨正礼. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3947-3955.
YANG Shu-jing, ZHANG Ai-ping, YANG Zheng-li. Agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation district and preliminary study of load estimation methods[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 3947-3955.
- [19] 莫明浩, 杨 洁, 顾 胜, 等. 鄱阳湖环湖区非点源污染负荷估算[J]. 人民长江, 2010, 41(17): 51-53, 91.
MO Ming-hao, YANG Jie, GU Sheng, et al. Estimation of non-point source pollution load in the area around Poyang Lake[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(17): 51-53, 91.
- [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): 540-544.
LI Huai-en, WANG Li, SHI Shu-juan. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shaanxi 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): 540-544.
- [21] 应兰兰, 侯西勇, 路 晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 90-99.
YING Lan-lan, HOU Xi-yong, LU Xiao, et al. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(6): 90-99.
- [22] 徐 靖, 银森录, 吴 楠. 广西西江流域植被移除磷素污染的生态系统服务价值[J]. 广西植物, 2013, 33(1): 52-57.
XU Jing, YIN Sen-lu, WU Nan. Ecosystem service value supplied by vegetation for avoiding phosphorus pollution within Xijiang River Basin, Guangxi[J]. *Guihaia*, 2013, 33(1): 52-57.
- [23] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: The use of export coefficient and structural models[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 221: 75-90.
- [24] 王全金, 徐刘凯, 向速林, 等. 应用输出系数模型估算赣江下游非点源污染负荷[J]. 人民长江, 2011, 42(23): 30-33.
WANG Quan-jin, XU Liu-kai, XIANG Su-lin, et al. A calculation and regulation method for reservoir's eco-environmental water demand[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(23): 30-33.
- [25] 康晚英. 环鄱阳湖区面源污染负荷的估算及预测评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
KANG Wan-ying. The evaluation and prediction of non-point source pollution in Poyang Lake Area[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [26] 王少璇, 冯民权, 武新朝. 汾河流域(运城段)非点源污染负荷研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2011, 2(2): 49-53.
WANG Shao-xuan, FENG Min-quan, WU Xin-chao. Research on total nitrogen load from non-point sources in the Fen River along Yuncheng[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2011, 2(2): 49-53.
- [27] 马广文, 王业耀, 香 宝, 等. 松花江流域非点源氮磷负荷及其差异特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 163-169.
MA Guang-wen, WANG Ye-yao, XIANG Bao, et al. Diversity characteristic and pollution load of non-point source total nitrogen and total phosphorus in Songhua River Basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl 2): 163-169.
- [28] 王秀娟, 刘瑞民, 何孟常. 松辽流域非点源污染 TN 时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 182-202.
WANG Xiu-juan, LIU Rui-min, HE Meng-chang. Spatial-temporal characteristic of non-point Source pollution(NPS) nitrogen in Songliao Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 182-202.