

DOI: 10.5846/stxb201801310270 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 程先. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化. 生态学报, 2018, 38(12): - .
Kong P R, Chen L D, Sun R H, Cheng X. Identification and optimized simulation of non-point source pollution risk patterns in the Haihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化

孔佩儒^{1,2}, 陈利顶^{1,2,*}, 孙然好^{1,2}, 程先^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 101407

摘要:面源污染是海河流域面临的主要水生态环境问题, 如何通过流域景观格局优化实现对面源污染的控制一直是研究的热点问题。通过最小累积阻力模型, 以海河流域为研究对象, 将流域景观要素及影响流域景观过程的外部因子相结合, 对海河流域面源污染风险格局进行了识别, 并将阻力格局与海河流域实测水环境指标进行相关性分析及验证, 在此基础上对流域污染风险进行识别与优化模拟。结果表明海河流域有 40% 以上 (130380 km²) 区域面临高污染风险, 集中分布在中南部平原地区以及山区河谷地带; 对此我们通过设置河流植被缓冲带进行格局优化模拟分析, 通过比较不同措施格局优化阻力值变化趋势表明, 对于二级河流水系, 加强河流两岸 600—1600 m 范围的人类活动管控, 可以有效降低污染物输出, 显著降低流域面源污染发生的风险。在面源污染风险等级较高的平原地区, 设置 300—400 m 植被缓冲带, 可将风险等级降低 50%, 设置 700—800 m 岸边植被缓冲带即可达到最佳效果; 而在山区地区因风险较低, 设置 400—500 m 的植被缓冲带即可达到最佳效果, 能够将污染风险在现有基础上降低 30%—40%。这一研究结果对于海河流域景观格局优化和面源污染风险控制提供了科学参考。

关键词: 海河流域; 景观格局; 最小累积阻力模型; 面源污染; 格局优化

Identification and optimized simulation of non-point source pollution risk patterns in the Haihe River Basin

KONG Peiru^{1,2}, CHEN Liding^{1,2,*}, SUN Ranhao^{1,2}, CHENG Xian^{1,2}

1 Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101470, China

Abstract: Non-point source pollution is a major water ecological environment problem that influences the water environment in the Haihe River Basin. Mechanisms for controlling non-point pollution by optimizing landscape patterns at the watershed scale has been a popular issue. In this study, the risk patterns of non-point source pollution was established using minimum cumulative resistance model, which combines landscape elements and external factors that influence landscape processes. Risk pattern verification was performed by correlation analysis between resistance values and measured pollutant data in the Haihe River Basin. Watershed non-point pollution risk was identified and simulation of landscape patterns were optimized based on the verified non-point source pollution risk patterns. The results showed that in the Haihe River Basin, more than 40% of the areas are at extremely high or high risk level, and are mostly concentrated in the southern plain area and mountain valleys along the river. The landscape pattern was optimized by setting the vegetation buffer zone along the riverside. The simulation analysis results indicated that in different sub-basins, strengthening controls on human activities to reduce the pollutant output in the areas within 600—1600 meters on both sides of the river can significantly reduce the risk of non-point source pollution. In plain areas of the Haihe River Basin, the high risk levels of non-point source pollution can be reduced by 50% by setting the vegetation buffer zone to 300—400 meters and a 700—800 meter vegetation buffer zone can

基金项目: 国家自然科学基金重大项目特大城市群地区城镇化与生态环境耦合机理及交互胁迫效应 (41590840)

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@cees.ac.cn

achieve the best effect. In mountainous areas with relatively low risk level, a 400–500 meter vegetation buffer zone can reduce non-point source pollution risk most effectively. The results of this study provide a scientific reference for optimizing landscape patterns to control non-point source pollution risk in the Haihe River Basin.

Key Words: The Haihe River Basin; landscape pattern; minimal cumulative resistance model; non-point source pollution; landscape pattern optimization

海河流域位于我国环渤海经济圈,在新中国成立后,尤其是改革开放以来,经济社会高速发展,对自然资源的过度开发带来了严重的生态环境问题^[1-2]。目前,海河流域面临严重的水资源短缺和水环境污染问题,生态环境日益恶化,极大地制约了经济社会的可持续发展^[3-4]。随着近年来社会各界对环境污染问题的重视,点源污染已经得到较好控制,面源污染成为影响流域水质的重要因子^[5, 6]。

景观格局与水环境之间的关系研究是当今景观生态学研究领域的一个关键科学问题^[7-8]。景观要素作为地球表面空间布局的复合体,其变化不仅能反应景观的结构与功能随时间的变化过程和规律,也能产生一系列生态效应^[9-10]。已有研究表明,景观要素的空间分布能够影响地表径流、生物地球化学循环等一系列生态和水文过程^[8, 11]。

当前景观格局与水质污染的研究中,一部分研究是将静态的景观格局指数与水环境质量之间的关系进行相关性分析^[11-13],一部分研究是凭借经验或赋予权重贡献法确定不同景观类型对面源污染生态过程的作用强弱^[14-15],而很少考虑影响景观过程的外部因素。总体上看,当前国内外对于景观格局与地表水环境的关系研究,更多的停留在格局指数及景观类型与水环境之间的静态关系,对于景观过程与地表水环境间的动态关系研究仍处于探索阶段。由于当前的景观格局指数的生态学意义并不明确,通过格局指数与水质污染物相关性分析得到的结果尚需进一步的解释,空间格局上的差异性以及污染物迁移输出过程的外部影响因子并未充分考虑,对此,部分学者已经开始注意到这个问题,王金亮等在长江三峡库区通过最小累计阻力模型构建了库区的面源污染阻力面,用阻力值大小来预测库区农业面源污染发生的潜在风险,对于研究面源污染动态过程与景观格局及外部因子的影响,具有很好的借鉴意义^[16]。从景观生态学原理出发,研究景观格局对地表水质污染物的影响,继而通过相关格局优化措施,改变污染物进入水环境的数量,影响地表水质,以此控制面源污染效果将是未来面源污染防控管理的一种有效途径。将影响景观生态过程的外部环境因子融入到景观过程,利用动态模型来识别面源污染风险格局,是当前景观格局与水环境关系研究的一个新兴方向。在海河流域这样的大尺度区域,将小尺度上的对每一个景观单元进行污染物的输入输出监测方法直接应用到大尺度区域进行面源污染风险的识别可行性极低,必须在宏观尺度上结合面源污染过程机理,对面源污染格局进行识别。

流域尺度上面源污染的发生过程,在景观层面上可看作污染物从源景观向外迁移并扩张到达水体所需克服阻力做功的过程,所需克服阻力越大,面源污染风险越低;阻力越小,风险越高^[16-17]。而最小累积阻力模型能够将大尺度区域的主要影响因子与面源污染物的输移过程进行结合^[16],以阻力成本的方式来识别面源污染风险程度。本文通过对海河流域面源污染风险格局构建,识别流域面源污染发生潜在风险,并在此基础上对流域提出格局优化建议,对于流域水环境面源污染的防控管理具有重要指导意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

海河流域位于我国华北地区北部,坐落于环渤海经济圈内,位于 112°—120°E 和北纬 35°—43°N 之间,东临渤海,西倚太行,南界黄河,北接蒙古高原,总面积 $3.18 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国总面积的 3.3%,是我国七大流域之一,也是我国政治文化中心所在地,人口密集,流域平均人口密度为 371 人/ km^2 ,为全国平均人口密度的 3.47 倍,在我国国民经济中占有重要地位。海河流域。全流域总地势西北高东南低,大致分高原、山地及平原 3

种地貌类型。西部为黄土高原和太行山区,北部为蒙古高原和燕山山区,东部和东南部为平原。流域分为子牙河流域(ZYR),漳卫河流域(ZWR),大清河流域(DQR),北三河山区(BSR),北四河下游平原(DPBSR),滦河流域(LR),徒骇马颊河流域(THMJR),黑龙港及运东平原(HLG),永定河山区(YDRMA)九个二级流域,其中子牙河,大清河,滦河以及漳卫河流域可分为上游山区(M)与下游平原(M)。

1.2 数据来源

本研究数据类型主要有地形、气象、土壤、植被、土地利用及地表水质等:(1)海河流域 DEM,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)的 SRTM DEM UTM 90 m 分辨率数字高程数据产品,生成海河流域坡度 slope 数据;(2)海河流域植被覆盖度数据 NDVI,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)的 MODEV1D,为中国 250 m EVI 月合成产品(TERRA 星),空间分辨率 250 m,时间为 2010 年的 12 个月;(3)海河流域降雨量监测数据来源于中国气象数据网 104 个气象站点 1990—2010 年数据,计算年均降雨量;(4)海河流域土壤,来源于全国第二次土壤普查;(5)海河流域 2010 年土地利用数据,来源于全国生态十年遥感评估数据,数据精度为 30 m。(6)地表水质来源于课题组 2013—2015 野外采样测定。本文除了 DEM、水系和土壤数据外,其余数据采集时间为 2010 年,栅格数据精度并不统一,有 30 m 精度,90 m 精度,以数据的最大精度为标准统一转换为空间分辨率为 90 m。

1.3 基于最小阻力模型的海河流域面源污染风险识别与格局优化

1.3.1 最小累积阻力模型简介

最小累积阻力模型(minimal cumulative resistance, MCR)最早用来反映物种从源地到达目的地运动过程中,克服不同类型景观的阻力,所做的功累积的最小值或耗费的最小成本,是耗费距离模型的衍生应用^[18],它反映的是一种可达性,后来被广泛应用于生态领域,如物种保护、土地利用规划等^[19]。该模型考虑源、空间距离和阻力基面 3 个方面因素。其表达式如下,

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i)$$

式中,MCR 是最小累积阻力值; f 是一个未知的单调递增函数, D_{ij} 是污染物从源 j 出发到达空间某一位置途中所穿越的景观 i 的空间距离,反应了水平方向上的阻力; R_i 是融合外部因子的景观 i 对该运动在垂直方向上的阻力^[20]。

1.3.2 面源污染风险识别

面源污染作为一个连续的动态过程,污染物迁移扩散过程中所受的阻力,除了受景观单元本身影响之外,还受外部自然环境因子的影响^[16],同时,面源污染物从地表输出到最后进入河流干道影响水环境,定会经过一定的空间距离,因此,借助最小累积阻力模型,先将景观要素及影响面源污染的外部因子相叠加形成面源污染扩散的垂直阻力基面(R),在此基础上融入空间距离因素(D),代入最小累积阻力模型计算面源污染过程阻力面值,即面源污染过程所需克服的阻力,最小累积阻力越小,面源污染发生的风险越大;反之,阻力越大,面源污染发生的风险越小。

具体做法,将上述影响面源污染发生的各因子的栅格离散值进行线性归一化,然后利用自然断点法进行 1—5 等级划分,级别越高表示阻力越大,同时利用专家打分法赋予各个因子的不同权重空间叠加,以此来表达影响流域面源污染过程的景观单元阻力基面(R),阻力基面反应的是景观单元及外部影响因子垂直方向对面源污染的阻力作用。基于阻力基面评价结果,进一步考虑空间距离的影响,依据最小累积阻力模型公式,运用 ArcGIS 10.2 中的 cost-distance 模块生成面源污染过程阻力面,以此构建海河流域面源污染风险格局。考虑到海河流域面积较大,区域性差异较为明显,在阻力格局构建过程中,均是在二级流域尺度进行,得到不同二级流域的面源污染阻力格局后,合成整个海河流域面源污染阻力格局,之后将阻力格局的阻力值与水环境数据进行相关性分析,对风险格局适用性进行验证,对流域不同地区的面源污染风险进行识别,依据最终的阻力面栅格图层,利用自然断点方法进行影响流域面源污染过程的等级划分,分为极低风险区、低风险区、中等

风险区、高风险区和极高风险区。面源污染发生的过程中,不同景观要素及外部因子对面源污染过程所起的阻力作用不同,从而影响到流域的面源污染风险。为此,本文将不同景观要素以及影响面源污染发生过程的因子作为影响面源污染的指标,以此构建影响海河流域面源污染的阻力基面。在面源污染发生过程中,土地利用类型对于污染物的输出具有重要作用,耕地建设用地能够促进污染物输出,草地林地等类型能够有效拦截污染物迁移;坡度因子能够影响土壤侵蚀携带污染物转移,坡度越大,土壤侵蚀越容易发生,阻力因子越小;降雨侵蚀力与土壤可蚀性因子同样反映污染物随土壤侵蚀流失的作用程度;植被覆盖度能够反映植被覆盖特征,植被覆盖度越高,对污染物迁移的阻力因子越大。综上,本文选取土地利用类型、坡度、降雨侵蚀力、土壤可蚀性和植被覆盖度。在指标赋权过程中,充分参参考已有研究,如王金亮等在三峡库区农业面源污染阻力格局分析^[17],结合海河流域实际情况,考虑各因子对污染物迁移输出的影响作用,土地利用类型对污染物的输出、迁移具有重要作用,因此空间叠加赋值时予以重点考虑;地表植被不仅能够蓄水减少径流,而且具备水质净化功能,对面源污染物扩散迁移同样具有重要影响;而地形地貌、气象水文等外部因子的作用相对较为固定,各自然因子间阻力作用差异并不明显,在此基础上,咨询相关专家采用专家打分法对不同因子予以赋值,各评价指标含义、权重与获取见表 1。

表 1 海河流域面源污染阻力基面评价指标及含义

Table 1 Evaluation factors and definition for non-point source pollution resistance base

评价指标 Assessment Factor	含义 Meaning
坡度(0.1) Slope	表示每个景观单元距离到最近水域的坡度,是地表侵蚀径流动力的加速因子。
土地利用类型 Land use(0.5)	土地利用类型能够区分面源污染产生的,耕地居民点等有利于污染物输出,林地草地等对污染物拦截作用较为明显。
降雨侵蚀力(0.1) Rainfall erosivity	反映由降雨所引起土壤分离和搬运的动力指标 ^[21] 。 $R = 0.0668P^{1.6266}$
归一化差异植被指数 NDVI Normalized difference vegetation index (0.2)	R 为降雨侵蚀力, P 为年均降雨量 植被覆盖度越高,对污染物拦截作用越为明显
土壤可蚀性(0.1) Soil erodibility	反映不同类型土壤所具有的侵蚀力速度。参考吴迎霞等的海河流域生态服务功能土壤可蚀性研究 ^[22] ,利用中国土壤数据库提取出海河流域土壤类型,在 ArcGIS 中赋值每种土壤类型的土壤可蚀性 K 值

1.3.3 海河流域面源污染风险控制与格局优化

景观格局要素合理空间布局,可以很好地起到减少面源污染物输出的作用,并且对污染物的迁移扩散起到拦截作用,从而降低流域面源污染风险。面源污染的发生,实质上是污染物从源景观出发后,迁移扩散克服景观内部以及外部阻力到达河流的过程。基于此,针对区域面源污染的格局调控,可以从污染物输出的源头控制与污染物迁移扩散的阻力增加两个方向,对区域面源污染风险格局进行优化调控。源头控制是对污染源进行控制,减少污染物输出的数量;污染物迁移扩散的阻力增加则是改变或切断污染物的迁移路线,增加污染物迁移扩散过程的阻力,使得进入水体的污染物数量大大减少,达到降低流域面源污染风险的效果。通过相关措施从以上两个角度对区域面源污染格局进行优化,通过优化后的区域面源污染风险阻力值变化来模拟优化效果。

要实现对流域面源污染风险进行管控,首先需要确定对河流产生影响的核心控制距离,在核心距离内加强土地利用管理和人类活动管控,进行景观格局优化。具体做法如下:借助流域面源污染格局构建方法,在不同子流域内,沿河道设置不同宽度的缓冲带(200,400,600 m,至 2000 m),分别剔除缓冲带内污染风险源(耕地,建设用地),设置为 no data,代入原栅格数据图层,以前文方法计算生成不同缓冲带的面源污染阻力面,重新计算阻力值,构建不同距离梯度阻力值曲线,通过阻力值曲线变化找到不同地区的核心控制距离。在确定核心控制距离后,在该距离范围内设置不同梯度植被缓冲带,代入前文数据图层,构建优化后的面源污染阻力面,通过阻力值变化模拟海河流域不同地区的面源污染风险优化效果。

2 结果与讨论

2.1 海河流域面源污染阻力格局构建及格局验证

基于最小累积阻力模型构建的海河流域不同二级流域面源污染阻力面及其组成的海河流域面源污染阻力面如图 1 及图 2 所示,平均阻力值见表 2,图例中“值”代表区域的最小累积阻力值。流域面源污染阻力格局整体特征表现为,距离河流干流越近,阻力面值越小,面源污染物越容易迁移到相关河道造成水环境污染;距离河流干道越远,阻力面值越大,污染物经过迁移转化到达水环境所需要克服的阻力越大,到达水环境的可达性越低,在总体上呈现出明显的向流域河道干流方向递减的空间梯度变化特征,山区的面源污染阻力面的阻力值显著高于平原地区,说明山区的面源污染风险要小于平原地区。

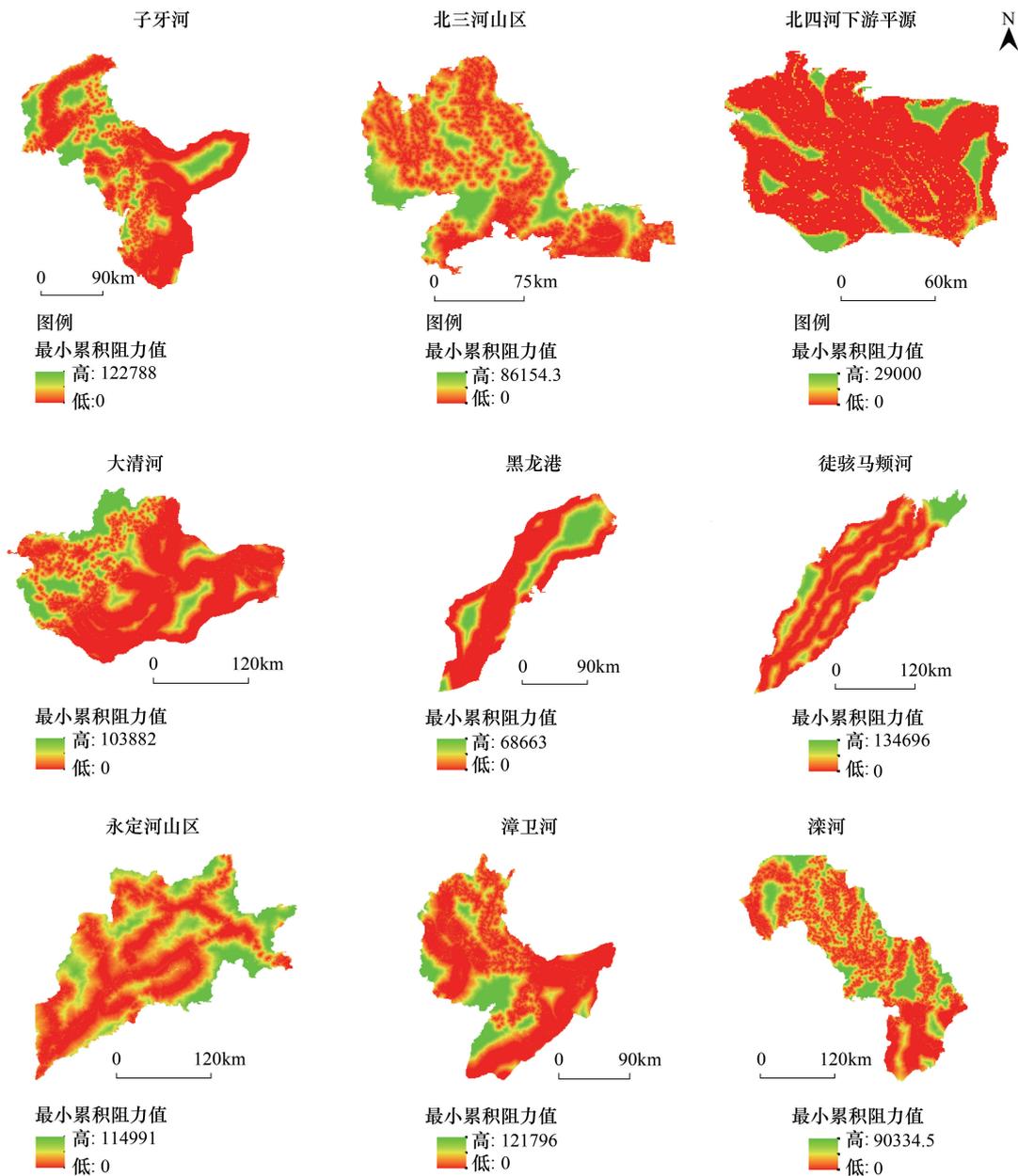


图 1 海河流域不同子流域面源污染风险阻力面

Fig.1 Non-point source pollution risk resistance pattern different sub-basin in the Haihe River Basin

图例中“值”代表的区域面源污染阻力面最小累积阻力值

将不同子流域阻力面值与海河流域地表水环境数据(表 2)进行相关性分析(本文所使用数据为 2013—2015 年海河流域不同区域 162 个样点重复采样测定,样点分布及水质污染结果详见已发表相关文章^[23]),相关性分析结果表明,在海河流域,面源污染阻力面值与水质污染物均呈负相关关系,其中,阻力值与水体富营养化指数(EI),总磷(TP),化学耗氧量(COD),氨氮(NH₃-N)极显著负相关,说明在海河流域,依据最小累积阻力模型构建的面源污染格局可以很好的用来表征流域的面源污染风险,在此基础上,对海河流域面源污染风险等级进行划分与识别。

2.2 海河流域面源污染风险格局识别

利用自然断点法对海河流域面源污染等级进行划分,结果如图 3。总体上,海河流域面临的面源污染风险相对较高,有 76320 km² 区域面临极高等级风险,约占流域总面积的 24%,54060 km² 区域存在着高等级风险,约占流域总面积 17%,海河流域总共有超过 40% 的区域面临极高与高等级的面源污染风险。中等、低与极低的面积分别为 73140、95400 km² 和 19080 km²,分别占流域总面积的 23%、30% 与 6%。从图 3 可以看出,西北部山区地区风险显著低于中南部平原地区,高等级风险区主要分布在流域中南部地区,西北部山区高风险区主要分布在河流流经的河谷地带。山区地带虽然坡度较大,有助于污染物的迁移扩散加速,但是山区地区植被覆盖度较高,土地利用方式以对污染物迁移具有很强拦截作用的林地为主,耕地及居民点等潜在污染源景

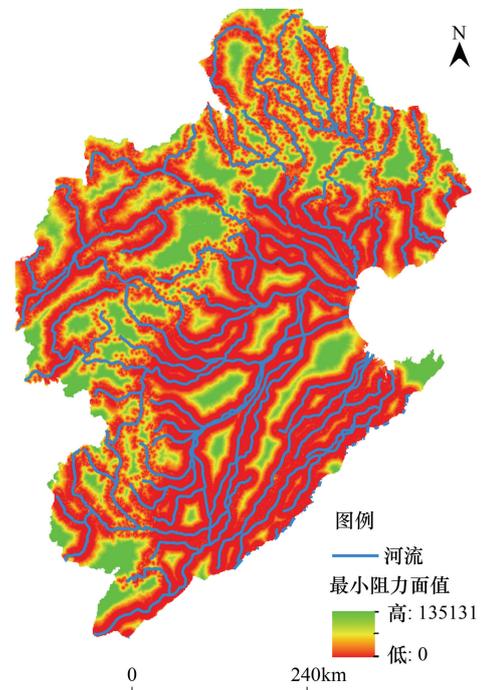


图 2 海河流域总体面源污染风险阻力面

Fig.2 Non-point source pollution risk resistance pattern in the Haihe River Basin

表 2 海河流域不同子流域面源污染阻力值及地表水质数据

Table 2 Non-point source pollution risk resistance value and pollutants in rivers in different sub-basin the Haihe River Basin

子流域名称 Sub-basin	最小累积 阻力值 Minimal cumulative resistance	富营养化指数 Eutrophication index	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/L)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg/L)	总氮 TN Total Nitrogen/ (mg/L)	总磷 TP Total Phosphorus ($\mu\text{g}/\text{L}$)	化学耗氧 量 COD Chemical oxygen demand/ (mg/L)
徒骇马颊河	11188	68.06	0.35	2.72	3.03	1.01	50.7
漳卫河平原	7941	74.43	1.39	3.68	7.65	0.90	44.6
漳卫河山区	23401	63.99	0.50	2.97	4.77	0.42	29.56
子牙河山区	20436	64.02	0.21	3.90	3.93	0.34	22.71
子牙河平原	12149	73.18	0.73	3.02	7.55	1.01	55.44
永定河山区	17245	65.56	0.62	4.90	5.61	0.35	26.84
黑龙港	16177	67.21	0.25	2.37	2.69	0.64	42.6
大清河平原	8740	70.27	0.81	3.96	6.73	0.84	29.27
大清河山区	25587	64.43	0.16	2.47	3.26	0.61	18.17
滦河山区	13504	67.84	0.22	2.84	3.76	1.43	35.18
滦河平原	21716	66.26	0.07	4.00	5.24	0.89	31.34
北三河山区	23193	66.59	0.06	2.852	5.14	0.59	38.89
北四河下游平原	5184	74.66	1.27	3.59	4.42	1.63	61.73

观相对较少,从较少的源景观输出的污染物经过大量的林地景观的拦截,到达河流干道所需克服阻力极大,因此面源污染潜在风险较低。而在平原地区,大中型城市聚集,耕地密布,大量的居民生活污水以及农药化肥等污染物通过地表径流的运输迁移更容易进入水体而产生污染,发生面源污染风险也高。

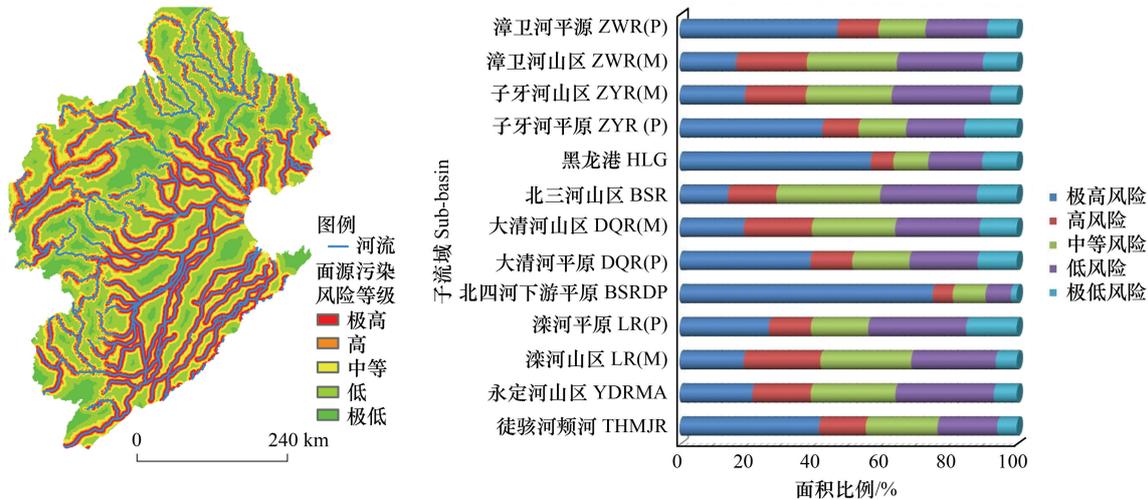


图3 海河流域及不同二级流域面源污染等级分布

Fig.3 Spatial distribution of non-point source pollution risk level in the Haihe River Basin and different sub-basin

子牙河山区 Ziya River Mountain(ZYR(M)),子牙河平原 Ziya River Plain(ZYR(P)),漳卫河平原 Zhangwei River Plain (ZWR(P)),漳卫河山区 Zhangwei River Mountain (ZWR(M)),大清河山区 Daqing River Mountain (DQR(M)),大清河平原 Daqing River Plain (DQR(P)),北三河山区 Beisan River Mountain (BSR),北四河下游平原 Beisi River Downstream Plain (DPBSR),滦河山区 Luan River Mountain (LR(M)),滦河平原 Luan River Plain (LR(P)),徒骇马颊河流域 Tuhaimajia River (THMJR),黑龙江及运东平原 Heilong Gang (HLG),永定河山区 Yongding River Mountain(YDRMA)

2.3 海河流域面源污染风险控制与格局优化

剔除不同距离梯度内污染景观单元后,海河流域不同子流域阻力面曲线变化如图4所示。通过图4可以发现,在剔除潜在污染源后,所有区域的面源污染阻力面阻力值均随距离的增加逐渐增大,在到达某一距离后,曲线趋于平缓。这一现象说明,随着距离河道距离的增加,潜在污染源对河流的影响逐渐降低,但是曲线拐点的出现并不同步,说明在不同的区域,由于不同的景观格局配置以及外部影响因子的共同作用。通过对比不同区域的阻力面值变化曲线,永定河山区,北三河山区,滦河山区3个区域曲线在600 m后趋于平缓,说明在这3个区域,600 m河岸带范围内的污染源景观对河流的影响显著高于600 m外区域,600 m外区域的污染源虽然也对水环境产生影响,但是趋于平缓的阻力值增加曲线说明他们对水环境污染的影响作用,由于距离衰减因素以及迁移扩散过程中其他景观的拦截,对河流产生的影响远小于600 m范围内污染源景观的作用。类似的,子牙河山区与大清河山区的核心控制距离大概为800 m;漳卫河山区核心控制距离为1000 m;子牙河平原与滦河平原核心控制距离约为1200 m;北四河下游平原,漳卫河平原以及大清河平原地区的核心控制距离约为1400 m;而黑龙江与运东平原以及徒骇马颊河平原的核心控制距离达到了1600 m。总体上,山区的核心控制距离要短于平原控制距离。

在海河流域不同区域河岸带核心控制距离内,沿河道设置不同距离梯度林地缓冲带进行格局优化,优化后的阻力值及模拟效果见图5,通过图5可以看出,设置不同距离梯度林地缓冲带后,流域不同区域面源污染风险均得到有效降低,在面源污染风险等级较高的平原地区,整体上,在面源污染风险较高的平原地区,沿河岸带设置300—400 m林地缓冲带,可将风险等级降低50%,700—800 m可达到最佳效果,超过800 m之后对区域的面源污染风险降低效果并不明显,诸如北四河下游平原,滦河平原,子牙河平原,大清河平原等地区;类似的,山区地区本身风险较低,设置400—500 m缓冲带可达到最佳效果,从图5可以看出,在山区,当林地缓

冲带达到 600 m 时,面源污染风险降低效果趋于平缓,诸如大清河山区,子牙河山区,滦河山区,北三河山区等区域。

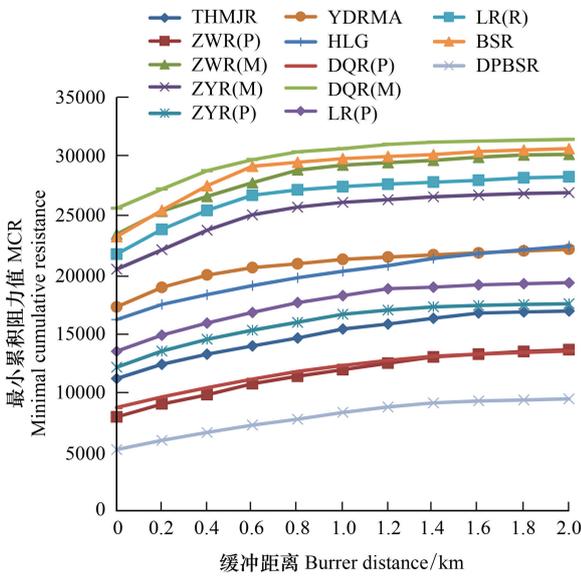


图 4 海河流域不同区域不同距离梯度缓冲带剔除污染源后面源污染阻力值变化曲线

Fig.4 Resistance value change curve of buffer zone set without pollution source in different sub-basin in the Hahe River Basin

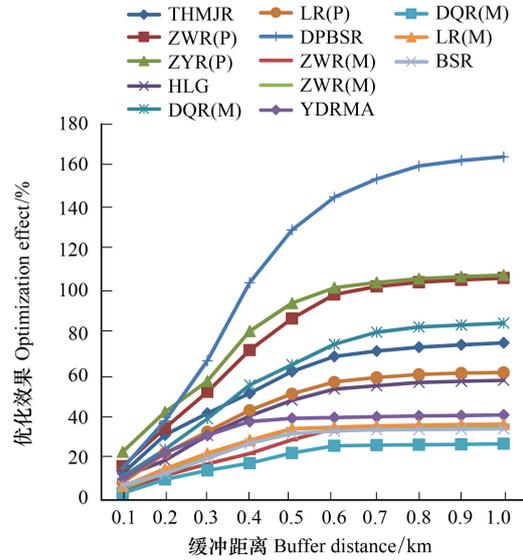


图 5 海河流域不同区域植被缓冲带设置后面源污染风险降低效果图

Fig.5 Effect of non-point source pollution risk reduction by setting vegetation buffer zone in different sub-basins

总体上,海河流域范围内,山区地区核心河岸带控制距离相对较短,平原地区,主要受土地利用类型及其空间配置所影响,平原地区土地利用类型以能够促进面源污染发生的耕地与居民建设用地为主,输出的污染物在迁移过程中没有林地草地等景观单元的拦截,因此,对河水环境影响的河岸带距离相对较长。而在山区地区,虽然坡度较大,并且存在着坡耕地,但是山区植被覆盖度高,分布这大量的林地草地,能够有效的拦截距离河岸较远的污染物向河流的迁移,再加上山区地区,本身河岸带周围就分布有林地等景观,因此,山区地区的控制距离相对于平原地区较短。格局优化模拟效果表明,平原地区设置林地缓冲带优化效果显著好于山区,平原地区河岸带几乎没有林地分布,设置林地缓冲带后,既减少了原有地区污染物的输出,又能对远距离污染物迁移至河道进行拦截,能够极大的降低面源污染发生风险,甚至达到 150% 以上;而山区地区,本身污染风险相对降低,设置林地缓冲带后,可以进一步降低污染风险,拦截河谷坡耕地等污染物迁移输出至河道对水环境产生影响,用一个相对距离较短的缓冲带即可达到最优拦截效果。

3 结论

本文通过最小累积阻力模型,综合考虑景观要素以及影响景观过程的外部因子,构建了海河流域面源污染风险阻力面,通过阻力面的阻力值大小反映面源污染发生的风险,通过与海河流域地表水环境监测指标进行验证,在此基础上构建海河流域的面源污染风险格局,并识别了流域污染风险区。结果表明,海河流域面临较高的面源污染风险,有超过 40% 的区域存在着高或者极高的风险,集中分布在中南部平原农耕区以及山区河谷地带。平原地区的风险显著高于山区风险,这是由不同地区的土地利用特点及空间配置所决定的。

为降低流域内面源污染发生的风险,需在流域内高风险地区加强土地利用的管理与格局优化。结果表明,针对海河流域不同地区特点,结果表明,重点加强 600 m 至 1600 m 距离的河岸带农田以及居民点管理,降低污染物输出负荷,降低污染源景观的土地利用强度,能够显著降低污染风险,同时,通过格局优化模拟,在海河流域不同区域,沿河岸带设置 400—800 m 缓冲带,可达到相对最佳优化效果,有效降低流域现有面源污染

风险。

本文基于最小阻力模型构建的面源污染风险格局,虽然考虑了景观要素以及影响景观过程外部自然因子的影响,在技术层面上仍然存在着一定的局限性,本文考虑了土地利用,植被覆盖度,降雨侵蚀力,土壤可蚀性,坡度等外部因子,但是影响面源污染发生过程的外部因子并不仅仅局限于此,此外,在阻力面构建过程中,虽然采用了专家打分进行阻力赋值,但是仍然存在着一定的人为主观性,需要在后续研究中对不同阻力赋值方式所产生的面源污染风险影响进行延伸拓展分析。不同土地利用类型的用地强度不同,在面源污染过程中的作用也不尽相同,在后续研究中,考虑土地利用强度因素,针对不同利用强度的土地利用类型进行划分,可使构建的阻力面模型更加精确,预测效果更加科学。

参考文献 (References):

- [1] 荣楠,单保庆,林超,郭勇,赵钰,朱晓磊. 海河流域河流氮污染特征及其演变趋势. 环境科学学报, 2016, 36(2): 420-427.
- [2] 夏军,黄浩. 海河流域水污染及水资源短缺对经济发展的影响. 资源科学, 2006, 28(2): 2-7.
- [3] 张仙娥,黄蓓蓓,冯成洪,王震,刘静玲. 海河流域河流整体污染特征及演变趋势分析. 创新科技, 2013, (2): 19-21.
- [4] 邱斌,李萍萍,钟晨宇,陈胜,孙德智. 海河流域农村非点源污染现状及空间特征分析. 中国环境科学, 2014, 32(3): 564-570.
- [5] 葛继红,周曙东. 农业面源污染的经济影响因素分析——基于 1978—2009 年的江苏省数据. 中国农村经济, 2011, (5): 72-81.
- [6] 李秀芬,朱金兆,顾晓君,朱建军. 农业面源污染现状与防治进展. 中国人口·资源与环境, 2010, 116(4): 81-84.
- [7] 王娇,马克明,张育新,唐荣莉. 土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响. 环境科学学报, 2012, 32(1): 57-65.
- [8] 于术桐,黄贤金,程绪水,马其芳. 流域土地利用变化的水质响应研究进展. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 422-426.
- [9] 傅伯杰,徐延达,吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.
- [10] 徐延达,傅伯杰,吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究. 生态学报, 2010, 30(1): 212-220.
- [11] 项颂,庞燕,窦嘉顺,吕兴菊,薛力强,储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. 生态学报, 2018, 38(3): 876-885.
- [12] 孙金华,曹晓峰,黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2052-2057.
- [13] 洪超,刘茂松,徐驰,杨雪姣,池婷,田颖. 河流干支流水质与土地利用的相关关系. 生态学报, 2014, 34(24): 7271-7279.
- [14] 刘芳,沈珍瑶,刘瑞民. 基于“源-汇”生态过程的长江上游农业非点源污染. 生态学报, 2009, 29(6): 3271-3277.
- [15] 李晶,周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析. 地理学报, 2014, 39(7): 933-944.
- [16] 王金亮,谢德体,邵景安,倪九派,雷平. 基于最小累积阻力模型的三峡库区耕地面源污染源-汇风险识别. 农业工程学报, 2016, 32(16): 206-215.
- [17] 李其林,魏朝富,王显军,赵中金,谢德体. 农业面源污染发生条件与污染机理. 土壤通报, 2008, 39(1): 169-176.
- [18] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study from Changzhou, China. Ecological Modelling, 2015, 318: 194-203.
- [19] Knaapen JP, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [20] Greenberg JA, Rueda C, Hestir EL, Santos MJ, Ustin SL. Least cost distance analysis for spatial interpolation. Computers & Geosciences, 2011, 37(2): 272-276.
- [21] 寻瑞,王克林,于闽,宋希娟. 基于侵蚀降雨特征的湘江流域 R 因子修正算法. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 32-37.
- [22] 吴迎霞. 海河流域生态服务功能空间格局及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [23] Kong P R, Cheng X, Sun R H, Chen L D. The synergic characteristics of surface water pollution and sediment pollution with heavy metals in the Haihe river basin, northern China. Water, 2018, 10(1): 73-73.