

DOI: 10.5846/stxb201901240188

许芬,周小成,孟庆岩,张颖.基于“源-汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价.生态学报,2020,40(8): - .

Xu F, Zhou X C, Meng Q Y, Zhang Y. Remote sensing identification and evaluation of non-point source pollution risk of drinking water source based on “source-sink” landscape. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

基于“源-汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价

许 芬¹, 周小成^{1,*}, 孟庆岩², 张 颖²

1 福州大学 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 数字中国研究院(福建), 福州 350108

2 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101

摘要: 非点源污染因分布广泛、产生过程复杂、防治困难, 近年成为影响饮用水源地水环境的重要污染源。以海南三亚赤田水库为例, 开展了基于“源-汇”景观的非点源污染风险遥感识别与评价分析。首先, 采用高分辨率遥感影像分类提取水源地不同类型景观分布信息; 结合“源-汇”对污染的促进\阻碍作用, 在考虑影响污染物迁移的“河道距离”因子、坡度因子情况下, 利用非点源污染风险指数的计算实现对区域非点源污染风险的快速识别; 并基于洛伦兹曲线分析水源地景观空间分布对非点源污染的影响。结果表明: 一方面, 流域非点源污染风险总体较低, “汇”景观占主导作用的子流域占整个区域的 76.50%; 污染风险呈现东高西低的特点, 极高风险区主要分布于以居住用地、建设用地等“源”景观类型为主的流域东南部区域, 占整体区域面积的 1.28%, 而西部以林地为主污染风险小; 另一方面, 基于坡度因子的“源”“汇”景观污染负荷之比大于 1, “源”景观在低坡度区域分布范围广, 景观布局较合理; 基于“河道距离”因子的“源”“汇”景观污染负荷之比为 2.30, “源”景观在距河道近的区域分布范围大, 对污染影响大, 近河道区域需进一步调整景观格局以降低对非点源污染的影响。基于遥感与“源-汇”景观指数计算是一种快速、客观、有效的饮用水源地的非点源污染风险识别与评价方法。

关键词: 非点源污染风险; “源-汇”景观; 洛伦兹曲线; 遥感; 三亚市赤田水库

Remote sensing identification and evaluation of non-point source pollution risk of drinking water source based on “source-sink” landscape

XU Fen¹, ZHOU Xiaocheng^{1,*}, MENG Qingyan², ZHANG Ying²

1 The Academy of Digital China(Fujian), Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2 Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Non-point source pollution has become an important source of pollution affecting the water environment of drinking water sources in recent years due to its wide distribution, complex production process and difficult prevention and control. This paper carried out remote sensing identification and evaluation analysis of non-point source pollution risk based on “source-sink” landscape in Chitian Reservoir. Firstly, high-resolution remote sensing image was used to extract different types of landscape distribution information of water source. Then, combined with the promotion/blocking effect of “source-sink” on pollution, considering the distance from the river and slope factor affecting the migration of pollutants, the non-point source pollution risk index was used to calculate the risk of non-point source pollution. And we analyzed the influence

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503900); 中央引导地方科技发展专项(2017L3012); 三亚市院地科技合作项目(2018YD10)

收稿日期: 2019-01-24; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouxc@fzu.edu.cn

of spatial distribution of water source landscape on non-point source pollution based on Lorenz curve. The results showed that the risk of non-point source pollution was low, and the sub-watershed dominated by “sink” landscape accounted for 76.50% of the whole area. The risk of non-point source pollution in the basin was high in the east and low in the west. The extremely high risk areas mainly distributed in the southeast of the basin, which were dominated by “source” landscape types such as residential land and construction land, accounting for 1.28% of the overall regional area. And the western region was dominated by forest landscape with little pollution risk. The ratio of pollution load of “source” and “sink” landscape based on slope factor was greater than 1, indicating that the “source” landscape had a wide distribution range in the low-slope region. The landscape layout was more reasonable among slope elements. The pollution load ratio of “source” and “sink” landscape based on the factor of “distance from the river” was 2.30, indicating that the “source” landscape had a large distribution range near the river course and had a great impact on pollution. Therefore, the landscape pattern near the river should be further adjusted to reduce the impact of non-point source pollution. The method of “source-sink” landscape index calculation based on remote sensing is a rapid, objective and effective method for the identification and evaluation of non-point source pollution.

Key Words: non-point source pollution; “source-sink” landscape; Lorenz curve; remote sensing; Chitian Reservoir; Sanya

作为供给居民生活用水的饮用水是人类最为重要的一种水资源^[1], 饮用水资源的保护及饮用水源地污染的防治尤其重要。饮用水水源污染主要分为点源、非点源(面源)两类, 其中点源是指有固定排放点的污染, 如工业废水和城市污水集中排放口; 非点源是指没有固定排放点, 污染物通过径流过程而汇入收纳水体的污染, 如种植业污染等^[2]。随着我国对点源污染的管理和控制, 非点源污染因其防治困难, 被认为是影响地表和地下饮用水源地安全的重要威胁^[3], 开展对饮用水源地非点源污染风险的研究成为当前的研究热点^[4-5]。

目前非点源污染负荷估算和污染风险的评估多采用模型模拟的方法, 如 Wang 等^[6]基于 ArcSWAT 模型分析不同土地利用模式对非点源污染的影响控制; Yang 等^[7]将 SWAT 模型与新安江模型结合, 对非点源污染的识别进行了尝试性研究。而模型模拟主要基于对非点源污染的过程进行模拟, 对数据要求比较高, 对于数据不完善的地区, 结合遥感技术, 利用景观生态学中“源-汇”理论分析景观空间格局对非点源污染的影响是实现非点源污染风险识别评价的有效途径。其中“源-汇”景观理论是基于“源-汇”景观类型在空间分布上的平衡情况进行生态环境的研究^[8], 当前以景观生态学为基础进行非点源污染研究中, 王金亮等^[9]基于最小累积阻力模型测算不同等级源的景观阻力面, 分析三峡库区面源污染的源-汇景观分布风险格局。景观空间分布的格局与非点源污染大小存在显著的响应关系^[10-11], 但当前多聚焦于流域整体的污染风险评价, 较少着眼于具体风险区域的识别; 同时目前的研究在确定“源-汇”风险强弱差异时, 更多的是凭借主观经验赋予影响权重来确定不同景观类型对生态过程的作用, 较少结合具体区域的污染风险特性来识别影响非点源污染的风险区域。

本文以三亚市赤田水库饮用水源地为例, 基于“源-汇”理论, 利用遥感技术获取以子流域为研究单位的“源”、“汇”景观的分布, 统计子流域“源汇”面积比重, 结合不同类型“源汇”景观对主要污染源磷、氮的排污权重, 对比每个子流域的“源”“汇”景观污染负荷风险, 分析污染物在子流域空间的盈亏平衡状况, 结合流域中景观单元养分流失与空间距离、所在坡面的坡度大小的关系, 计算非点源污染风险指数, 实现饮用水源地非点源风险区域的识别; 再基于洛伦兹曲线, 通过“源-汇”景观类型在不同坡度、距水源地不同距离的分布分析景观布局对非点源污染的影响, 实现水源地非点源污染分析的评价, 为水源地管理、规划提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

赤田水库位于海南省三亚市东北部藤桥西河的下游区域,介于 $18^{\circ}24'N-18^{\circ}26'N$, $109^{\circ}38'E-109^{\circ}44'E$ 之间(图 1),属热带海洋性季风性气候,地形总体西高东低;控制流域面积 220.6 km^2 ,总库容 771 万 m^3 ,每年的实际供水量占三亚供水总量的 60%,是三亚市重要的城市集中式饮用水水源地;随着经济的发展,一方面水源地供水压力不断增加,另一方面土地的开发利用加重水源地污染风险,实现非点源污染风险识别对于污染的防治非常重要;同时由于赤田水库横跨三亚市海棠区和三道镇,属跨市县水源地,管理复杂,识别水源地风险区域对于明确管理职责、实现“谁污染,谁治理”具有重要意义。

1.2 数据来源与处理

本研究主要采用由中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>)提供的高分一号 PMS 传感器数据,包括 4 个多光谱波段与 1 个全色波段,其中多光谱波段空间分辨率为 8 m ,全色波段空间分辨率为 2 m ;美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov/>)提供的空间分辨率为 30 m 的 DEM 数据;以及海南省水系分布矢量数据。

饮用水源地非点源污染风险识别首先需要确定风险识别范围,根据饮用水污染中污染在水里,而源头在陆地这一特点,确定以饮用水源地流域为研究范围进行污染风险的识别。因此基于 DEM 数据与海南省水系分布数据,利用 Arcgis 中水文分析工具提取流向、河流汇集个数、汇流点等信息,以此为输入信息确定水源地流域范围,输出结果矢量作为研究区范围。

其次为保证遥感影像数据质量和分类效果,利用 ENVI 软件对遥感影像进行预处理。首先对 GF-1 影像进行正射校正,其次,利用 ENVI 中的 FLAASH 模块进行大气校正,再次,采用 NNDiffuse Pan Sharpening 方法对 GF-1 影像中全色波段与多光谱波段进行融合,获得空间分辨率为 2 m 的多光谱影像(图 2)。

2 研究方法

本文基于非点源污染特点和研究区地物类型建立遥感分类体系,基于随机森林算法对赤田水库水源地进行饮用水源地遥感监测,结合“源-汇”景观理论中源汇景观类型对污染物分别产生促进\阻碍作用和不同景观类型污染能力的不同,为各地类赋予不同的污染权重,再以子流域单元为对象分析各子流域的“源-汇”负荷对

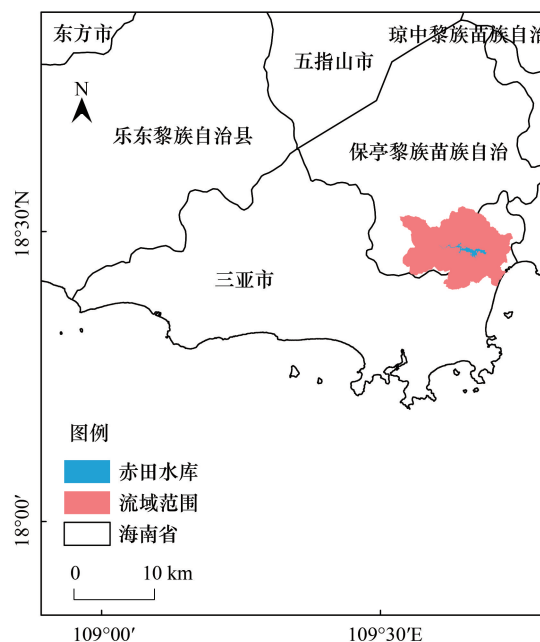


图 1 研究区区位示意图

Fig.1 Location of the study area

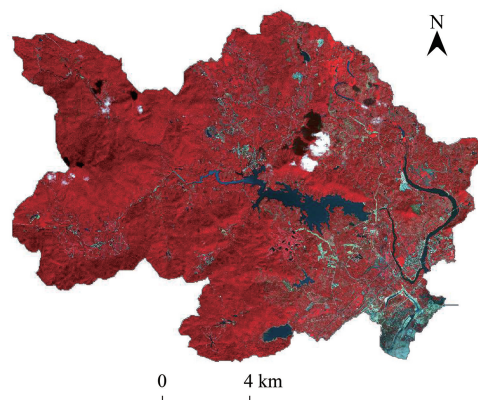


图 2 研究区高分 1 号标准假彩色合成影像

Fig.2 Standard false color composite image of GaoFen1 in the study area

比,分析“源”“汇”景观格局对污染风险的作用;进一步考虑坡度、距河道远近等污染迁移因子对污染风险大小的影响,通过污染风险指数计算各子流域单元的污染风险,识别水源地风险区域,并基于洛伦兹曲线评价不同景观类型的空间布局对污染风险的影响,最终实现水源地非点源污染风险的识别与评价。具体技术流程如图 3:

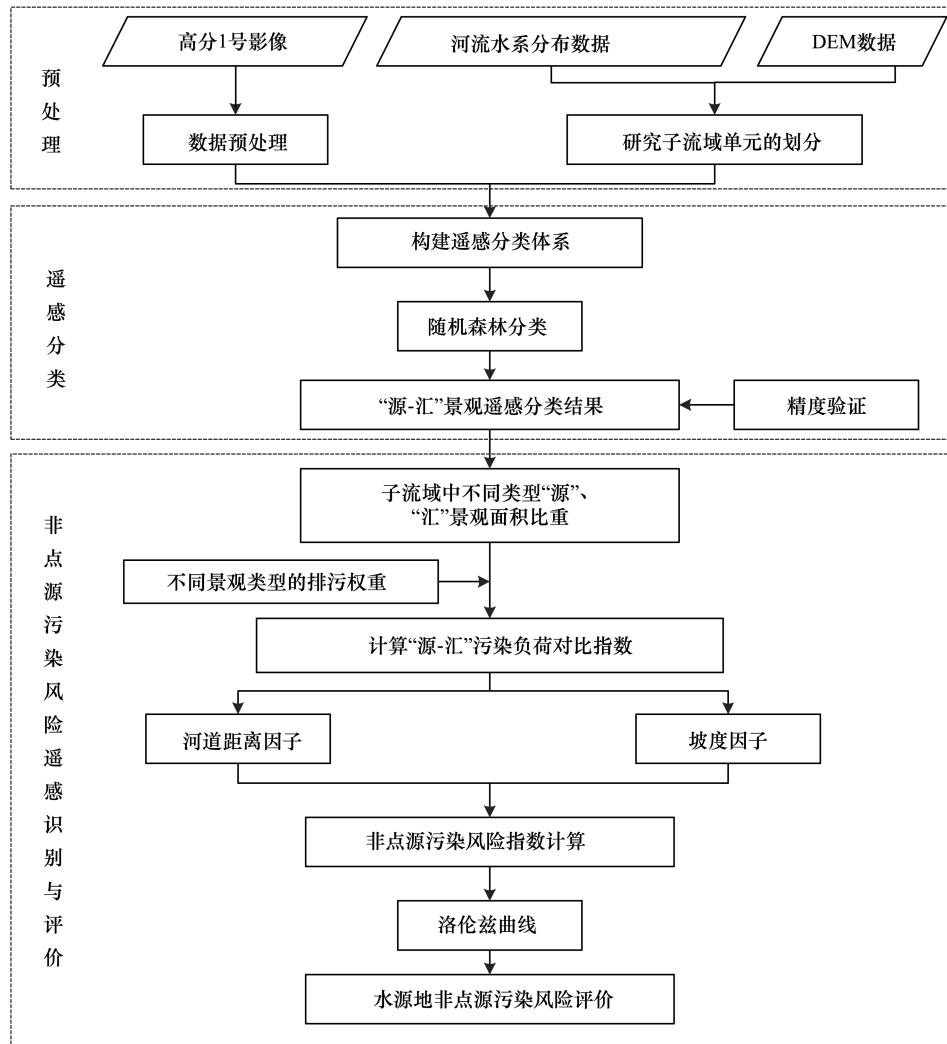


图 3 技术流程图

Fig.3 Technique flow chart

2.1 非点源污染风险地类遥感监测分类

非点源污染风险的识别首先需要建立饮用水源地遥感监测分类体系,参照土地利用分类标准(GB/T 21010—2017),并根据研究区流域非点源污染特点和遥感可识别范围,将流域内景观类型分为耕地、园地、居住用地、建设用地、水产养殖、有林地、草地、水体、未利用地;采用 Leo 等^[12]提出的随机森林算法进行赤田水库流域范围内的遥感景观分类。随机森林算法属于机器学习的一种,由多个能进行分类的决策树共同形成“森林”,每个决策树之间无关联,对于输入的训练样本由各个决策树分别对其进行分类,在整个“森林”中,样本最终分为归属类别多的一类。

根据下列算法建造决策树:

- (1)用 N 来表示训练样本的个数, M 表示特征数目;
- (2)输入特征的数目 m ,以此确定决策树中各个节点的决策结果;其中 M 为特征总数量,因此 m 数量小

于 M ;

(3) 以有放回抽样的方式从 N 个训练样本中取样 n 次, 构成一个用于训练的集合 (bootstrap 取样), 对于剩下未抽到的样本用来预测, 进行误差的评估。

(4) 对于每个节点, 随机选择 m 个特征, 决策树上每个节点的决定都基于这些特征确定, 并根据这 m 个特征, 计算其最佳的分类方式。

基于随机森林的遥感景观分类首先需要根据各地类在遥感影像中表现出来的特征进行样本选择, 形成训练样本集; 分析样本的光谱、形状、纹理等特征, 根据互信息最大化特征选择算法^[13]对特征进行优化, 从众多的特征中选择出最佳特征子集, 将优选出的特征用于随机森林中各个决策树的构建, 以多数决策树分类结果作为最终分类结果, 完成不同地类的区分; 最后通过验证点的分类结果与实际分类类型构建混淆矩阵, 验证遥感分类精度。

2.2 非点源污染风险识别

2.2.1 “源-汇”污染负荷对比指数

“源-汇”污染负荷对比指数 (Location-weighted Landscape Contrast Index, LCI) 是以一定范围的景观单元为研究对象, 计算该单元“源”景观所产生的污染负荷风险与“汇”景观所能削弱的污染负荷风险进行对比, 旨在考虑景观间相互作用的前提下, 分析一定范围自然地理空间的污染风险, 实现污染风险区域的识别。如蒋孟珍等^[14]提出网格景观空间负荷对比, 将区域划分为大小一致的网格, 对比每个网格单元中“源”“汇”对非点源污染的贡献, 识别出“污染贡献”大于“污染截留”区域为风险区。

但是, 风险区域识别中单纯以行政区或几何网格为研究单元, 划分形式和大小的差异会影响风险识别结果, 造成结果的不确定性; 同时以行政区或几何网格为研究单元割裂了原有自然地理联系, 忽略了区域地理空间单元的异质性和区域生态效应。因此, 本文以自然景观格局为依据, 基于研究区域地形、河流交汇点、流向等自然地理要素划定子流域空间单元; 根据景观生态学中“源-汇”理论, 将遥感分类结果中对污染起推动作用的类型归为“源”, 如耕地、园地等; 将遥感分类结果中对污染起截留、阻碍作用类型归为“汇”, 如草地、有林地等, 通过“源-汇”污染负荷对比指数比较子流域“源”“汇”作用的大小, 子流域单元中“源”景观作用大于“汇”景观则区域为风险区。“源-汇”污染负荷对比指数的计算公式如下^[14]:

$$LCI_N = \sum_{i=1}^n W_{iN} \times S_i - \sum_{j=1}^n W_{jN} \times S_j \quad (1)$$

$$LCI_P = \sum_{i=1}^n W_{iP} \times S_i - \sum_{j=1}^n W_{jP} \times S_j \quad (2)$$

$$LCI_{NP} = LCI_N + LCI_P \quad (3)$$

式中, LCI_N 、 LCI_P 、 LCI_{NP} 分别为总氮、总磷、氮磷总体的污染负荷; i 为“源”景观的种类数, W_{iN} 、 W_{iP} 分别为“源 i ”排放总氮、总磷的权重, S_i 为“源 i ”景观类型在单位子流域所占的面积比例; j 为“汇”景观的种类数, W_{jN} 、 W_{jP} 分别为“源 j ”排放总氮、总磷的权重系数, S_j 为“源 j ”景观类型在单位子流域所占的面积比例。

其中景观类型的面积比例是基于遥感分类结果统计得到, 不同景观类型的污染权重则根据不同景观类型对污染作用大小的差异确定。不同景观类型污染物输出权重对于风险的识别评价尤其重要, 本文基于全国污染源普查手册^[15-16]、统计年鉴^[17]等资料, 采用输出系数法^[18]计算相关景观类型的输出权重, 对难确定权重的类型则以相同或相似研究区的相关文献为依据, 通过直接或间接的方式确定。其中耕地污染输出权重是以农业污染源普查手册中“地表径流-南方湿润平原区-平地-水田-双季稻”区域的标准农田流失系数作为依据, 总氮流失量为 $13.99 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 总磷流失量为 $1.15 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 其中标准农田的总施氮量为 $360.88 \text{ kg hm}^{-2}$ 、总施磷量为 $109.19 \text{ kg hm}^{-2}$; 结合统计年鉴中区域实际的总氮施肥量 $837.11 \text{ kg hm}^{-2}$ 、总磷施肥量 $531.71 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 确定氮磷施肥修正系数分别为 2.32、4.77; 标准农田降水量在 1000—1200mm 之间, 三亚市 2016 年年降水量为 1716.3mm, 确定降水修正系数为 1.5, 计算得到研究区耕地总氮 (TN)、总磷 (TP) 流失量如下:

$$\text{TN} = 13.99 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1} \times 2.32 \times 1.5 = 48.68 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

$$TP = 1.15 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1} \times 4.87 \times 1.5 = 8.40 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

农业污染源普查手册中监测类型为地表径流、地形为缓坡区、土地利用方式为旱地、种植模式为园地的标准农田总氮流失量 $19.95 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 总磷流失量 $1.60 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其中标准农田中氮磷施肥量分别为 $418.33 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $193.34 \text{ kg hm}^{-2}$, 结合三亚统计年鉴中氮磷的实际年施用量 $837.11 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $520.02 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 得到修正分别为 2.0、2.6。计算出园地氮磷排污量如下:

$$TN = 19.95 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1} \times 2.0 = 39.90 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

$$TP = 1.60 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1} \times 2.6 = 4.16 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

根据城镇生活源排污手册中三亚市生活源污水污染物人均产生系数总氮为 $10.07 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 总磷为 $0.81 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 根据三亚市 2016 统计年鉴中常住人口为 19.17 万人, 居民点建设面积 4732 hm^2 , 计算出居住用地氮磷排污量如下:

$$TN = (0.01007 \text{ kg 人}^{-1} \times 191700 \text{ 人} \times 365) / 4732 \text{ hm}^2 = 148.90 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

$$TP = (0.00081 \text{ kg 人}^{-1} \times 191700 \text{ 人} \times 365) / 4732 \text{ hm}^2 = 11.98 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

根据水产养殖业污染源产排污系数手册中的我国南部区域淡水网箱养殖产氮 33.917 g kg^{-1} , 产磷 7.688 g kg^{-1} , 结合三亚统计年鉴中水产养殖产量 $2758000 \text{ kg a}^{-1}$ 与所占面积 695 hm^2 , 计算水产养殖的氮磷排污量如下:

$$TN = (33.917 \text{ g kg}^{-1} \times 0.001 \times 2758000 \text{ kg a}^{-1}) / 695 \text{ hm}^2 = 134.59 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

$$TP = (7.688 \text{ g kg}^{-1} \times 0.001 \times 2758000 \text{ kg a}^{-1}) / 695 \text{ hm}^2 = 30.51 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1};$$

城镇生活源产排污系数手册中海南省建设用地标准产排污系数总氮为 7.65 g d^{-1} , 总磷为 0.725 g d^{-1} , 计算得到研究区建设用地氮磷排污量分别为 $35.74 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $3.15 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

詹书侠等^[19]对中亚热带典型丘陵红壤区中的土壤氮磷截留研究得到不同类型林地氮磷截留分别在 $0.15\text{--}1.43 \text{ g kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、 $0.19\text{--}0.54 \text{ g kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 之间, 而赤田水库流域林地以热带丘陵红壤区常绿阔叶林为主, 需要对截留值进行修正, 结合海南省不同森林氮储量^[20]确定修正系数分别为 12.0、3.0, 得到有林地平均氮吸收能力为 $94.95 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 磷吸收量为 $7.80 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。草地对氮的吸收量为林地的 80%, 对磷的吸收能力为林地的 85%^[21], 因此研究区草地的氮磷吸收量分别为 $75.90 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $6.63 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

不同河流对氮、磷的净化功能与温度、水位、面积等有关^[22], 同时不同区域的河流状态差异大, 难以用统一的标准衡量污染去除量, 因此通过河流与标准农田中耕地对氮磷排放的相对关系^[23]确定水体对氮、磷吸收权重分别为 0.01、0.03。

最终得到不同景观类型对主要污染物氮、磷的污染排放权重, 如表 1。

表 1 景观类型污染输出权重

Table 1 Pollution output weight of landscape type

景观类型 Type	N 值 Value of N	P 值 Value of P	N 权重 Weight of N	P 权重 Weight of N
耕地 Plowland	48.68	8.40	0.33	0.28
居住用地 Residential land	148.90	11.98	1	0.39
园地 Orchard	39.90	4.16	0.27	0.14
建设用地 Construction land	35.74	3.15	0.24	0.10
水产养殖 Aquaculture	134.59	30.51	0.90	1
有林地 Forest	94.95	7.80	0.64	0.26
草地 Grass;	75.90	6.63	0.51	0.22
水体 Water	—	—	0.01	0.03
未利用 Unused land	—	—	0.24	0.10

第 i 种景观类型的权重 = 第 i 种景观类型 N、P 标准排放 (吸收) 量 / 景观类型中最大 N、P 标准排放 (吸收) 量; N、P 标准排放 (吸收) 量最大的景观类型权重为 1

2.2.2 非点源污染风险指数

“源-汇”景观空间污染负荷对比指数反映空间的产污、截污能力,而污染物从景观单元迁移到水源地产生污染风险还与地形、距河网距离、土壤、降水等因素有关。地形因素主要表现为坡度大小对污染迁移的影响,单位子流域景观所处的坡度越大越容易造成污染迁移,污染风险越大^[24],本文以子流域为单元利用 ArcGIS 中的分析工具,通过填洼、坡度分析等工具提取 DEM 数据中的坡度信息,再建立与最大坡度的比值得到影响污染物迁移的坡度因子,值越大对风险贡献越大,反之对污染贡献越小。河道距离因素则以子流域污染迁移到河网的成本距离表示,基于 ArcGIS 中成本距离工具计算经过任何指定像元(水源地到“源”“汇”空间)所需的成本,成本越高越难以迁移,对污染影响越小,对风险的贡献越小。根据海南省土壤类型分布数据(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),研究区以砖红壤为主,土壤类型较单一;同时由于研究区面积较小,降水差异小,区域内土壤和降水条件相似,因此不考虑土壤差异及降水因素对污染迁移的影响。

结合景观空间“源-汇”污染负荷风险指数计算出的各个子流域的产污风险大小,将地形因子、距河道距离因子纳入非点源污染风险指数的计算,基于非点源污染风险评价指数,评价各子流域单元的非点源污染风险,公式如下:

$$NPPRI_m = LCI_{m/NP} \times \left(1 + \frac{Slope_m}{Slope_{max}}\right) \times \left(1 - \frac{Distance_m}{Distance_{max}}\right) \quad (4)$$

式中, $LCI_{m/NP}$ 为子流域 m 的氮磷总体污染负荷, $Slope_m$ 为子流域 m 的坡度, $Distance_m$ 为子流域 m 的河道成本距离; $NPPRI_m$ 表示第 m 个子流域的非点源污染风险指数,非点源污染风险指数的大小代表污染风险的高低,以此来划分高污染风险区和低污染风险区。

2.3 非点源污染风险评价

非点源污染研究中常基于“源-汇”理论分析“源”“汇”景观的空间分布格局及其与水源地非点源污染的关系,一般基于景观单元相对于流域出口(监测点)的坡度、距离、相对高度进行衡量,“源”景观距出口越近、所处坡度越大、相对高度越小则对污染贡献越大,反之贡献小,“汇”景观与之相反。本文基于对整个区域的遥感分类结果及景观空间要素中坡度、相对距离在区域中的分布,结合洛伦兹曲线分析整体范围内“源”、“汇”类型距污染出口远近、所处坡度大小情况,探讨水源地整体区域的“源-汇”空间布局对非点源污染风险的影响。

“源”“汇”景观空间分布通过洛伦兹曲线表示,如图 4,横轴 OA 表示景观类型与流域出口的距离、景观类型的坡度,纵轴 OC 表示景观类型占区域面积比例的累积, ODB 与 OFB 分别表示不同类型的面积累积曲线, OEB 为平均分布曲线,表示“源”“汇”景观在流域中均匀分布。假设位于平均分布曲线 OEB 上方的曲线 ODB 表示在距离要素下的“源”类型,说明“源”景观在距离源地近的距离范围所占比例大,对污染影响大;假设处于平均分布曲线 OEB 下方的曲线 OFB 并表示在距离要素下的“汇”景观,则说明“汇”大多处在距离源地较远的区域,对源地污染的消解作用小;曲线 ODB 与线 OA、AB 构成的面 OABD 和曲线 OFB 与线 OA、AB 构成面 OABF 之比表示“源”“汇”景观空间分布的对比,当比值大于 1 说明“源”的贡献大于“汇”,区域污染风险大。

本文在进行洛伦兹曲线计算中,距离景观要素为景

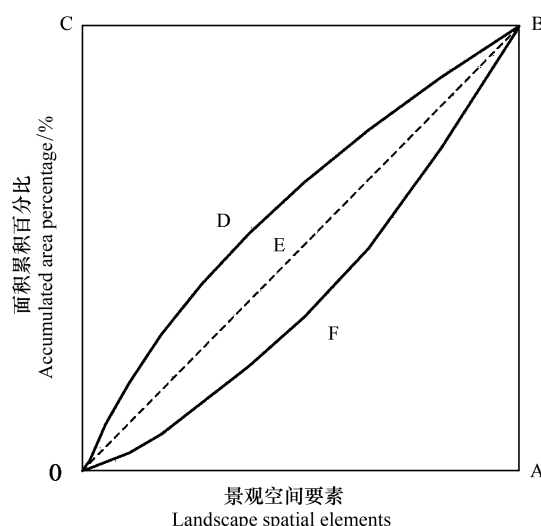


图 4 “源”“汇”景观空间分布示意图

Fig.4 Scheme figure of spatial distribution of “source” and “sink” landscape in Cachment

观类型距离水源地的距离,选用的坡度要素是基于高程数据得到的景观单元的坡度值,并将值都归一化到[0,1]之间。遥感分类结果中的景观类型与距离、坡度因子叠加,统计“源-汇”景观类型在不同距离和坡度范围的面积比例并累加得到距离、坡度要素的源汇曲线,并对比“源”“汇”面积累积曲线组成不规则三角形的面积,在距离要素中,当“源”“汇”面积累积比值大于1,即“源”景观累积面积大于“汇”景观累积面积,说明“源”分布在距河道较近区域,产生污染风险大,反之风险小;在坡度要素中,当比值大于1则说明“源”分布在坡度较低的区域,“汇”分布在坡度高的区域,难发生养分流失,污染影响小,反之影响大。

3 结果与讨论

3.1 “源-汇”景观的遥感分类结果

在研究区范围内根据“源-汇”遥感分类体系选取训练样本,进行特征分析与优化,选取光谱特征中的各波段平均值、标准差、亮度,形状特征中面积、形状指数、长宽比,纹理特征中差异性、对比度、信息熵、同质性等特征参与随机森林分类,经实验设置随机森林算法中决策树个数参数为80,决策树深度为16,利用eCognition软件中随机森林算法进行分类,结果如图5。根据分类结果与随机验证样本点构建混淆矩阵如表2,其中Kappa系数达到87.07%,分类结果精度较高。“汇”景观中林地分布最广,占流域的71.38%,且主要分布于流域西部;“源”景观中耕地面积占总面积的4.50%,居民用地占4.16%,建设用地分别占总面积的3.10%,总体而言“汇”景观分布广于“源”景观。

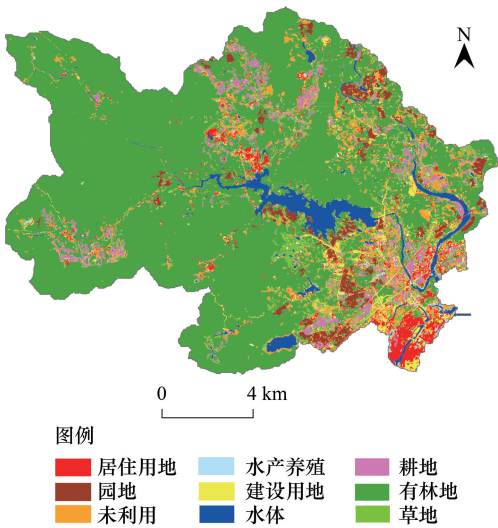


图5 “源-汇”景观遥感分类结果图
Fig. 5 Remote sensing classification results of “source-sink” landscape

表2 遥感分类结果混淆矩阵
Table 2 The confusion matrix of remote sensing classification results

	有林地 Forest	水产养殖 Aquaculture	园地 Orchard	水体 Water	居住用地 Residential land	建设用地 Construction land	草地 Grass	耕地 Plowland	未利用地 Unused land	总计 Total
有林地 Forest	174	0	2	0	0	0	1	3	0	180
水产养殖 Aquaculture	0	11	0	4	1	0	1	0	0	17
园地 Orchard	4	0	22	0	0	0	0	0	0	26
水体 Water	0	3	0	24	0	2	0	0	0	29
居住用地 Residential land	0	0	2	0	43	3	0	0	1	47
建设用地 Construction land	0	0	0	0	3	25	0	0	2	30
草地 Grass	0	0	0	0	0	0	14	1	0	15
耕地 Plowland	2	0	1	0	0	0	2	28	0	33
未利用地 Unused land	1	1	0	0	1	0	0	0	20	23
总计 Total	181	15	25	28	48	23	18	32	23	400

总体精度:90.25%;Kappa 系数:87.07%

3.2 非点源污染风险识别结果

3.2.1 “源-汇”污染负荷识别

根据流域地形与河网数据,结合遥感影像的可识别空间范围以1km²范围为集水区,划分子流域作为风险识别单元,统计遥感分类结果中各个子流域中“源”“汇”景观类型占该子流域的面积比例,利用不同地物类型

排放氮、磷污染的输出系数计算污染负荷,再结合“源-汇”污染负荷对比指数(LCI)识别区域中非点源污染风险具体区域分布情况,得到非点源污染“源-汇”负荷分布图(图6)。LCI 值在 $[-0.30, 0.38]$ 之间,其中“源”景观占主导作用即 LCI 大于 0 的子流域占整个区域的 23.49%，“汇”景观占主导作用即 LCI 小于 0 的子流域占整个区域的 76.50%。结果表明,流域非点源污染风险总体较低,以“汇”作用主导的子流域占流域的大部分;高污染负荷区域主要分布在东南部,西部污染负荷低,结果与“源-汇”景观分类结果密切相关,西部以林地等“汇”景观占主导,呈现出污染吸收能力强污染负荷低的情况;而东南部以建设用地、耕地等“源”景观分布居多,污染量大而截留削减能力弱,污染负荷高。

将“源-汇”污染负荷结果由低到高划分为 5 个等级(表 3),其中“源-汇”污染负荷中“汇”作用最大的污染负荷等级最低,LCI 范围在 $(-0.30, -0.17)$ 之间,占流域面积的 7.85%,主要是分布在西北部以林地类型为主的“汇”景观主导区域,对污染具有较强的截留作用;“汇”作用较大的污染负荷等级低,LCI 范围在 $(-0.17, -0.04)$ 之间,占流域面积的 50.10%,在所有等级中所占比例最大,主要分布在西部大部分区域;“源-汇”污染负荷较平衡的 LCI 范围接近 0,在 $(-0.04, 0.04)$ 之间面积占比 27.63%,主要分布于居住用地、耕地等“源”景观及林地等“汇”景观相间分布的北部区域;“源”作用高于“汇”作用,LCI 范围在 $(0.04, 0.17)$ 之间的面积占比 9.77%;LCI 范围在 $(0.17, 0.38)$ 之间的面积占比 4.65%,主要分布于东南部,以建设用地、居住用地等“源”景观主导的区域,污染负荷风险高。

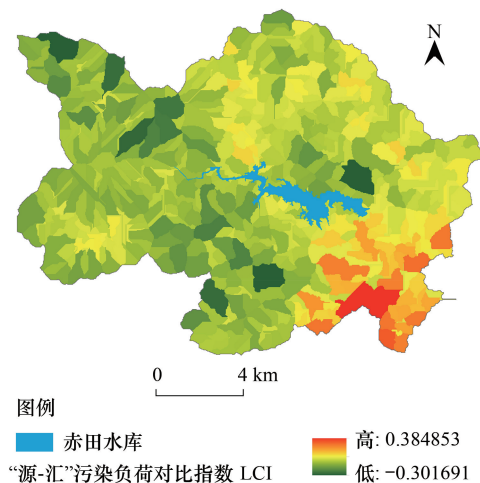


图6 “源-汇”污染负荷分布

Fig.6 “Source-sink” pollution load distribution

表 3 不同“源-汇”污染负荷等级面积对比

Table 3 Area comparison of different levels of “source-sink” pollution load

污染负荷等级 Grade of pollution load	极低风险区 Extremely low risk zone	低风险区 Low risk zone	中风险区 Medium risk zone	高风险区 High risk zone	极高风险区 Extremely high risk zone
“源-汇”污染负荷对比指数的范围 The range of the Location-weighted Landscape Contrast Index (LCI)	$(-0.30, -0.17)$	$(-0.17, -0.04)$	$(-0.04, 0.04)$	$(0.04, 0.17)$	$(0.17, 0.38)$
面积比重 The proportion of area	7.85%	50.10%	27.63%	9.77%	4.65%

3.2.2 水源地非点源污染风险指数

“源-汇”空间污染负荷指数一定程度上体现子流域的污染风险,而“河道距离”因子、坡度因子等污染迁移因子则表示非点源污染迁移风险(图7、图8),结合污染风险与迁移风险计算非点源风险指数(NPPRI),利用 ArcGIS 中栅格计算工具叠合“源-汇”污染负荷对比指数、“河道距离”因子、坡度因子得到非点源污染风险识别结果(图9)。

在 Arcgis 中按自然断点法将研究区范围中风险值分为由低到高的 5 类,其中极低风险区占整个区域面积的 40.26%,低风险区占 39.71%,中等风险区占 13.82%,高风险区占 4.93%,极高风险区占 1.28%,整体而言非点源污染风险较小,呈现出东高西低的特点。非点源污染高风险区主要位于流域东南部,景观格局以“源”作用为主,同时距河道较近,产污风险与迁移风险都较高,形成高风险区;流域西部整体风险偏低,但在西南部存在两个风险高值区主要受坡度及“源”景观作用;赤田水库西北临近区域存在风险高值,该区域产污风险和周围区域差异不大,但由于其距水源地近、坡度大,极易产生风险迁移,因此非点源污染风险大。

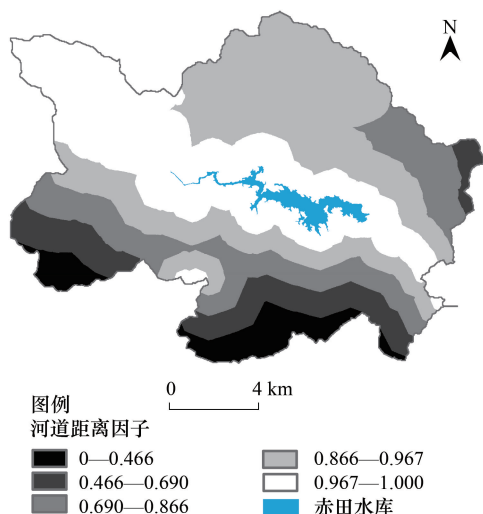


图7 “河道距离”风险因子

Fig.7 The risk factor of “distance from the river”

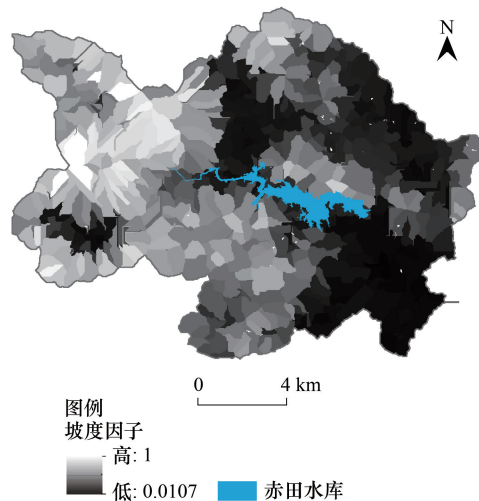


图8 坡度风险因子

Fig.8 The risk factor of slope

3.3 “源-汇”空间分布及水源地非点源污染风险评价

结合“源”“汇”景观的遥感分类结果与影响污染迁移的坡度、河道距离要素,基于洛伦兹曲线结果分析“源-汇”景观分布格局,实现流域非点源污染风险评价。河道距离要素中“源-汇”景观集中分布在河道距离(主要是赤田水库水域范围)因子的0-0.5范围(图10),“源”景观类型中水产养殖在距水库较远区域的分布比重较大,对非点源污染的影响较小,然而“源”景观类型中耕地布局在靠近水库区域的面积比重大,易于产生污染风险;坡度要素中“源-汇”景观分布集中于低坡度因子范围(图11),其中林地分布在坡度较高的地区,此种布局有利于防治非点源污染。

根据不同景观类型在距离、坡度要素中的洛伦兹曲线,计算“源”“汇”类型的洛伦兹曲线构成的累积面积(表4)并对比“源”“汇”面积,在河道距离要素中累积面积最大的为耕地,其次分别是林地、草地,同时“源”

与“汇”累计面积之比的值大于1,说明“源”景观分布在距水库较近的区域,污染风险较大;在坡度要素中,累积面积最大的为建设用地,其次为耕地、草地,最小的类型为林地,“源”与“汇”累计面积之比的值大于1,说明“源”景观分布在坡度较小的区域,污染发生的风险性较低。赤田水库流域中景观类型在坡度因素中的分布格局利于污染的截留,保证了易发生污染迁移的区域为“汇”景观;而在距离因素中的分布则容易促成污染,耕地等“源”景观距水源地过近,缺少“汇”景观在水源地附近对污染起截留作用。

4 结论与展望

本文基于遥感技术对赤田水库水源地进行“源-汇”景观分类,结合污染负荷对比指数计算每个子流域非点源氮磷污染的污染负荷,在综合考虑距河道远近、坡度因子对污染迁移的影响下,计算非点源污染风险指数

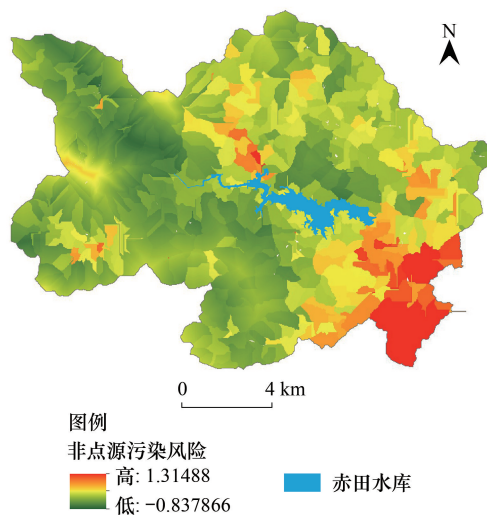


图9 非点源污染风险识别图

Fig.9 Non-point source pollution risk identification chart

识别出流域中非点源污染风险区,并基于洛伦兹曲线对水源地景观分布情况进行风险评价。研究结论如下:

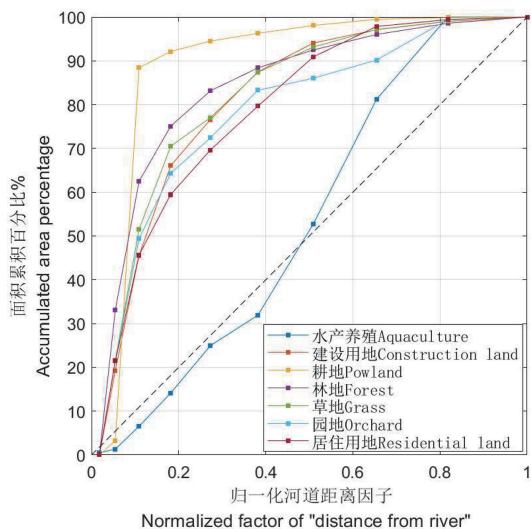


图 10 河道距离因子的洛伦兹曲线

Fig.10 Lorenz curves of the factor of "distance from river"

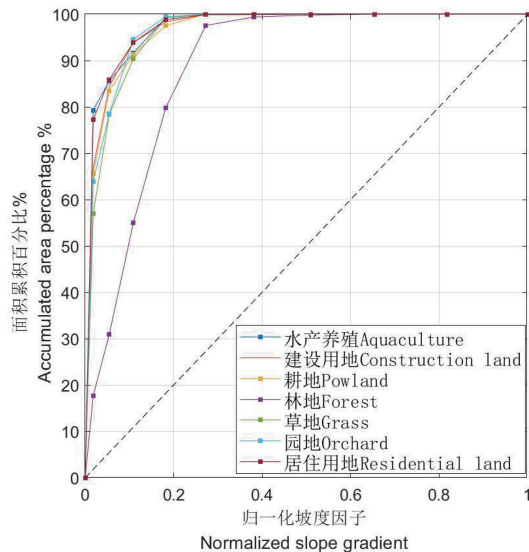


图 11 坡度因子的洛伦兹曲线

Fig.11 Lorenz curves of the factor of slope gradient

表 4 主要“源”“汇”景观洛伦兹曲线的面积对比

Table 4 Area-comparison of Lorenz curves of the main "source" and "sink" landscapes

不同景观类型的累积面积占比% The cumulative area proportion of different landscape types	水产养殖 Aquaculture	建设用地 Construction land	耕地 Plowland	林地 Forest	草地 Grass	园地 Orchard	居住用地 Residential land	“源”“汇”对比 Contrast between “source” and “sink”
河道距离因子 The factor of “distance from river”	54.01	81.2	89.22	83.95	81.97	78.4	78.9	2.30
坡度因子 The factor of slope gradient	97.28	96.93	96.65	88.85	96.26	96.74	97.33	2.62

(1) 基于“源-汇”遥感分类结果,结合污染负荷对比指数、坡度、河道距离因子计算非点源污染风险因子能快速有效识别出非点源风险,同时分布区域景观分布格局对非点源污染的影响,能为饮用水源地规划管理提供有效依据。

(2) 赤田水库各子流域单元中“源”景观占主导作用即 LCI 大于 0 的子流域占整个区域的 23.49%，“汇”景观占主导作用的子流域占整个区域的 76.50%，少分子流域呈现“源”“汇”作用平衡的情况，流域非点源污染风险总体较小。

(3) 基于非点源污染风险指数识别出赤田水库水源地非点源污染风险呈现东高西低的特点，极高风险区主要分布于流域范围的东南部地区，占整体区域面积的 1.28%，景观格局以居住用地、建设用地等“源”景观类型为主，同时距河道较近易于迁移形成非点源污染；低风险区主要位于西北部，以林地景观为主，非点源污染少、截留作用强。

(4) 赤田水库在坡度要素中“源”“汇”景观分布较合理，坡度高易产生污染的区域为“汇”景观分布，能有效防止污染；而在距河道距离要素中，“源”“汇”景观分布存在“源”距离水源地过近，对污染贡献大的现象，尤其是耕地分布距水源地较近，在距离水源地近的区域应多布局“汇”景观，达到污染截留作用，从而降低污染风险。

本文以小范围子流域为研究单元进行非点源风险遥感评价，子流域单元内降雨、土壤因子相对统一，因此未考虑此类因素的影响，但对于大范围研究区域，不同流域间降水、土壤等因子也会影响非点源污染分布，后

续研究需进一步考虑这些因素对非点源污染风险的影响。

参考文献 (References):

- [1] 曲天歌. 饮用水水源安全评价研究现状及方法综述. 农村经济与科技, 2018, 29(19): 47-48.
- [2] 刘庄, 晁建颖, 张丽, 解宇锋, 庄巍, 何斐. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题. 水科学进展, 2015, 26(3): 432-442.
- [3] 姚延娟, 王雪蕾, 吴传庆, 高彦华, 吴迪, 殷守敬, 唐菊俐. 饮用水源地非点源风险遥感提取及定量评估. 环境科学研究, 2013, 26(12): 1349-1355.
- [4] 荆延德, 樊蕊. 基于 CNKI 和 WOS 的非点源污染模型的研究热点及趋势分析. 生态学报, 2018, 38(11): 4077-4087.
- [5] Xin X K, Yin W, Li K F. Estimation of non-point source pollution loads with flux method in Danjiangkou Reservoir area, China. Water Science and Engineering, 2017, 10(2): 134-142.
- [6] Wang Q R, Liu R M, Men C, Guo L J. Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT. Journal of Hydrology, 2018, 560: 86-96.
- [7] Yang S T, Dong G T, Zheng D H, Xiao H L, Gao Y F, Lang Y. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China. Ecological Modelling, 2011, 222(20/22): 3701-3717.
- [8] 王桥, 吴传庆. 水环境遥感应用原理与案例. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Wang J L, Shao J A, Wang D, Ni J P, Xie D T. Identification of the "source" and "sink" patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(10): 1431-1448.
- [10] Wang J L, NI J P, Chen C L, Xie D T, Shao J A, Chen F X, Lei P. Source-sink landscape spatial characteristics and effect on non-point source pollution in a small catchment of the Three Gorge Reservoir Region. Journal of Mountain Science, 2018, 15(2): 327-339.
- [11] 陈裕婵, 张正栋, 万露文, 张杰, 杨传训, 叶晨, 李青圃. 五华河流域非点源污染风险区和风险路径识别. 地理学报, 2018, 73(9): 1765-1777.
- [12] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [13] Peng H C, Long F H, Ding C. Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1226-1238.
- [14] 蒋孟珍. 基于遥感技术的九龙江河口区非点源污染"源-汇"结构分析[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2012.
- [15] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查-城镇生活源产排污系数手册. 北京: 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室, 2008.
- [16] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 第一次全国污染源普查-水产养殖业污染源产排污系数手册. 北京: 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组, 2009.
- [17] 海南省统计局. 海南省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [18] Cheng X, Chen L D, Sun R H, Jing Y C. An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(21): 20946-20955.
- [19] 詹书侠, 陈伏生, 胡小飞, 甘露, 朱友林. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤氮磷有效性. 生态学报, 2009, 29(9): 4673-4680.
- [20] 王帅. 海南岛不同类型森林生态系统氮储量研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- [21] 方婧, 曹文志, 蒋文志, 黄虹, 蔡龙炎, 苏彩霞, 王飞飞. 河岸植被土壤系统对面源污染的削减和净化研究. 环境科学导刊, 2010, 29(4): 49-53.
- [22] 胡颖. 河流和沟渠对氮磷的自然净化效果的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [23] 周立柱, 杨顶田, 尹小青. 海南新村港和黎安港非点源污染负荷估算. 生态科学, 2018, 37(3): 11-20.
- [24] 陈利顶. 源汇景观格局分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2016: 25.