第73卷 第9期
2018年9月

地 理 学 报
ACTA GEOGRAPHICA SINICA

Vol.73, No.9
September, 2018

五华河流域非点源污染风险区和风险路径识别

陈裕婵[1],张正栋[1],万露文[2],张 杰[1],杨传训[3],叶 晨[1],李青圃[1]

(1. 华南师范大学地理科学学院,广州 510631; 2. 密歇根州立大学地球与环境科学系,美国 东兰辛 48823;
3. 广州地理研究所,广州 510070)

摘要: 非点源污染是亟待解决的水环境问题之一,确定非点源污染过程中的潜在风险区和风险路径是解决非点源污染问题的关键。引入景观生态学中的最小累积阻力模型,以高污染负荷的耕地、建设用地为"源",运用表示下垫面产流性质的地形湿度指数和CN值构建阻力面,对五华河流域的非点源污染高风险区和风险路径进行可视化识别和分析。结果显示:① 在下垫面产流作用下,五华河流域低产流区主要分布在流域西南部,高产流区呈"人"形贯穿全流域。② 最小累积阻力模型能够有效识别流域内非点源污染风险区和风险路径,五华河流域非点源污染高风险区分布于迴龙、田心、龙母、铁场、登云、通衢、鹤市、紫市、岐岭、华城、转水、潭下、水寨等地的河道两岸,以耕地为"源"的非点源污染风险路径与建设用地为"源"的非点源污染风险路径在空间分布上差异较大。③ 耕地对五华河水质的影响大于建设用地对五华河水质的影响,耕地中的富营养物质和沉积物更容易随地表径流进入受纳水体。④ 流域尺度上治理以耕地为"源"的非点源污染应在邻近耕地的河流两岸建立一定宽度的植被缓冲区,治理以建设用地为"源"的非点源污染宜围绕关键源区进行治理。本研究为非点源污染风险区和风险路径的识别提供一种新的思路,为进一步开展非点源污染治理提供理论依据。

关键词: 非点源污染;风险区识别;风险路径识别;最小累积阻力模型;五华河流域
DOI: 10.11821/dlxb201809012

1 引言

随着点源污染得到有效控制，非点源污染对水体污染的贡献日益显著[1-3]。非点源污染具有随机性、模糊性、分布广泛等特点，导致其治理点位难以确定[4-5]。研究发现流域的某些小范围区域上会产生流域内绝大多数的污染负荷[6]，如果这些区域还易于产生地表径流，就会使大量富营养物质和沉积物随地表径流快速迁移进入受纳水体，从而对水体造成严重污染，这部分对水体污染有决定性作用的区域被定义为关键源区（Critical Source Areas, CSAs）[7]。关键源区是严重威胁水体安全的风险区，治理关键源区能以最小成本达到最大程度遏制非点源污染的目的，这成为当前治理非点源污染的重要思路之一[8-10]。以关键源区为代表的非点源污染风险区的识别有效划定了非点源污染治理的面状范围，但在非点源污染发生的过程中，富营养物质和沉积物随地表径流发生迁移是呈线状流动的。要进一步精确判断非点源污染的治理地点和治理方式，就必须探究富营养物质随径流迁移形成的线状风险路径。目前，对于非点源污染风险区识别的研究较多[11-13]，

收稿日期: 2017-07-10; **修订日期:** 2018-05-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(41471147) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41471147]
作者简介: 陈裕婵(1993-), 广西钦州人, 硕士研究生, 主要从事景观格局与水文过程耦合研究。
E-mail: 2016022026@m.scnu.edu.cn
通讯作者: 张正栋(1968-), 甘肃榆中人, 教授, 主要从事景观格局与水文过程耦合研究。E-mail: zhangzdedu@163.com
1765-1777 页

却缺乏非点源污染风险路径识别的研究。

为此本文引入景观生态学中的最小累积阻力模型，用以识别流域非点源污染风险区及污染物迁移的风险路径。最小累积阻力模型是基于“源”和阻力表面研究物质可达性的一种方法，能有效提取区域内的线状生态流，在识别构建线状生态廊道方面得到了广泛运用[14-17]。近年来最小累积阻力模型逐渐被用于非点源污染研究中，如Wang等用相对高程、相对坡度等7个自然影响因子构建阻力基面，运用最小累积阻力模型对三峡库区的耕地面源污染源—汇风险格局进行了识别[18]；付永虎根据不同土地利用类型对营养物质的迁移能力构建阻力面，用最小累积模型划设非点源污染重点阻控区，从而实现对非点源污染控制[19]。但是现有研究仍然局限在面状非点源风险区的识别上[20-21]，缺乏线状风险路径识别研究。

1978年以来，五华河流域在社会经济飞速发展的同时，水环境问题日益突出，非点源污染成为亟待解决的严峻问题之一。本文以五华河流域为例，以流域下垫面产流性质构建阻力表面，基于最小累积阻力模型对五华河流域的非点源污染高风险区和风险路径进行识别和分析，以期为非点源污染风险区和风险路径的识别提供一种新的思路，为进一步开展非点源污染治理提供理论依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区域

五华河为韩江一级支流，发源于广东省龙川县回龙乡亚鸡寨，经龙川县与桥头水河汇合后流入五华县，在岐岭镇与岐岭河汇合，流经华城镇、转水镇，在大坝镇与琴江河相汇流入梅江，是五华县境内主要河道之一（图1）。五华河全长105 km，流域面积为184335 hm²，流域内地势西南高东北低，地形以丘陵为主，为亚热带季风气候，年均温20 ℃，年平均降水量1500 mm。五华河流域土壤类型以赤红壤为主，因常年种植水稻，于河流两岸分布着较大范围的水稻土。流域内土地利用类型以林地为主，耕地沿河分布，建设用地主要分布在流域南部。随着区域内经济的迅速发展，城镇化水平的不断提高，五华河流域的环境问题也日益突出，尤其是流域水体遭受不同程度的污染，使非点源污染成为亟待解决的严峻问题之一。识别研究五华河流域的非点源污染风险区和风险路径具有十分重要的现实意义。

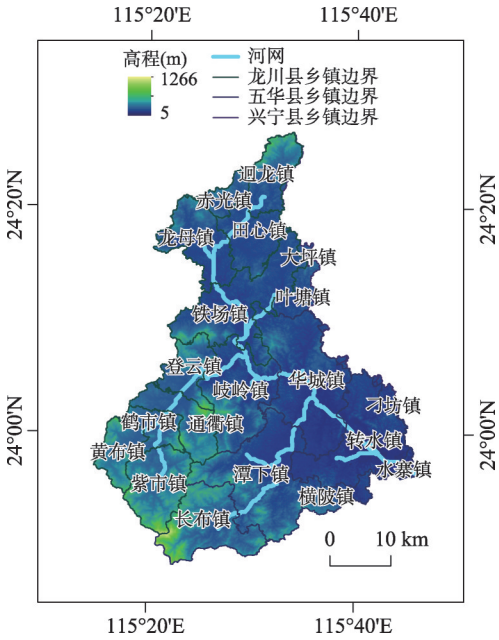

图1 五华河流域区位图

Fig. 1 Location of Wuhua River Basin

2.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、土壤数据和DEM数据。① 土地利用数据：选取2015年的土地利用类型数据，比例尺为1∶10万，来源于中国科学院的遥感解译数据。② 土壤数据：土壤类型数据为2010年广东省土壤类型数据，比例尺为1∶10万，来源于中国科学院。土壤属性数据主要来源于广东省第二次土壤普查成果《广东土种志》[22]。③ DEM数据：采用GDEM V2数字高程数据，分辨率为30 m，来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）。

3 研究方法

3.1 最小累积阻力模型

最小累积阻力模型由“源”和阻力表面构成[23]。在景观生态学“源—汇”的理论中，“源”是一个过程的源头，通过对景观类型与非点源污染负荷相关性研究发现，氮、磷污染高负荷区主要集中在农业用地和城镇用地[24-27]，这两类景观是发生非点源污染的源头，即非点源污染中的“源”景观。大量的富营养物质和沉积物质随地表径流从“源”景观发生迁移，下垫面越容易产流，污染物迁移所遇下垫面阻力就越小[28]。用下垫面产流性质构建最小累积阻力模型的阻力表面，能够反映污染物从“源”到目标地的迁移力度和迁移方向。最小累积阻力模型中的“源”可以反映风险区定义中的高负荷源区，下垫面产流性质构建的阻力表面能够反映风险区定义中的污染物迁移难易程度，其中污染物迁移累积阻力最小的路径为风险路径。因此，用最小累积阻力模型来识别区域非点源污染风险区和风险路径是合理可行的。最小累积阻力模型的数学表达式为[29-31]：

$$MCR = f_{\min} \sum (D_{ij} \times R_i) \tag{1}$$

式中：MCR为最小累积阻力；f表示累积阻力值与D_{ij}和R_i间的函数关系，表达从源到空间某一点的相对易达性；min表示取函数的最小值；D_{ij}是源j到景观单元i的实地距离；R_i是景观单元i对运动过程的阻力值。

3.1.1 源 在流域生态过程中，“源”斑块直接影响区域中生态流的大小[32-33]，携带污染物质的地表径流作为生态流之一，大小同样受到“源”斑块的制约。如果“源”斑块面积小污染负荷不足，污染物质在迁移过程中极有可能被下垫面截留和转化，最终不会进入到受纳水体中。所以要根据流域的实际情况对“源”斑块设定面积阈值，选取大于阈值的耕地和建设用地作为“源”。结合已有的研究[34-35]和五华河流域的实际情况，研究提取流域中所有大于1000 hm^2的耕地和大于50 hm^2的建设用地为“源”。

3.1.2 阻力表面 用下垫面产流性质来构建最小累积阻力模型的阻力表面。下垫面产流性质用地形湿度指数和CN值来表示。

（1）地形湿度指数

地形湿度指数能够准确反映地形变化对地表径流的影响，其大小由区域的坡面汇流面积和水力坡降两要素决定，地形湿度指数越大表示坡面汇流面积越大、水力坡降越低[36]，则该区域的饱和带发展潜力越大，土壤就越容易达到饱和而产生地表径流。地形湿度指数的表达式为[37-38]：

$$TWI = \ln\left(\alpha / \tan\beta\right) \tag{2}$$

式中：TWI为地形湿度指数；α为等高线长度的汇流面积；β为该点的坡度。对于以栅格形式DEM表示的流域，α为网格单元汇水面积与DEM栅格尺寸的比值；β为对单元网格起作用的局部坡度角。

（2）CN值

CN值是表示土地利用类型和土壤类型对地表产流影响的函数，可以较好的反映下垫面土地利用类型和土壤类型差异对汇流过程的影响。CN值越大，径流深越大，降雨量转为径流量越多[39]。美国农业部土壤保持局总结了常见的土地利用类型和土壤水文分组条件下的CN值，对CN表进行查找即可得到相应的CN值（表1）。

但国内缺乏相应的土壤水文分组数据，需要使用美国农业部开发的SPAW软件对现有的土壤质地数据进行处理。SPAW中输入的土壤粒径数据采用的是美国制标准，而中

国第二次土壤普查采用的是国际制标准，因此必须将国际制标准土壤粒径转为美制标准土壤粒径。两种标准土壤粒径的差异如表2所示。

在进行土壤质地转换时，三次样条插值的结果相对误差最小[40]。基于Matlab平台，对研究区的土壤质地进行三次样条插值转换。将转换后的各土壤类型中的Sand和Clay的百分比按要求依次输入到SPAW软件中，得到各土壤的饱和导水率，根据陈腊娇[41]和贺维[42]所修订的水文分组标准（表3），最终获得土壤水文分组数据。

3.2 非点源污染风险区和风险路径识别方法

本文提取五华河流域中所有大于1000 hm^2的耕地和大于50 hm^2的建设用地为“源”，将*TWI*栅格数据和CN值栅格数据进行叠加作为阻力表面，基于ArcGIS的cost weight工具和cost path工具分别获得污染物从“源”到河道的累积阻力距离和最小累积阻力路径，由此得到流域非点源污染的风险区和风险路径。

表1 五华河流域土地利用类型及相应的CN值

Tab. 1 CN value of each landuse type in Wuhua River Basin

土地利用类型	不同土壤水文类型的CN值			
	A	B	C	D
水田	58	69	77	80
旱地	60	72	79	83
有林地	30	55	70	77
灌木林地	35	56	70	77
疏林地	45	66	77	88
其他林地	43	65	76	82
高覆盖度草地	39	61	74	80
中覆盖度草地	49	69	79	84
水域	100	100	100	100
城乡居民点用地	57	72	81	86
工交建设用地	81	88	91	93

表2 国际制和美制土壤粒径对比

Tab. 2 Contrast of International and USA standard in soil texture systems

国际制标准		美制标准	
分类	分类标准(mm)	分类	分类标准(mm)
黏粒	< 0.002	Clay (黏粒)	< 0.002
粉砂	0.002~0.02	Silt (粉砂)	0.002~0.05
细砂粒	0.02~0.2	Sand (砂土)	0.05~2
粗砂粒	0.2~2	Gravel (砾石)	> 2
石砾	> 2	—	—

表3 水文分组标准及流域土壤水文分组

Tab. 3 Hydrologic groups criteria and soil classification in Wuhua River Basin

水文分组	性质	饱和导水率(mm/hr)	对应流域土壤类型
A	在完全湿润的条件下土壤具有较高的渗透率。此类土壤主要由砾石组成，排水、导水能力强，因此产流低。	> 110	——
B	在完全湿润的条件下土壤具有中等的渗透率。此类土壤主要由砂壤组成，排水、导水能力中等。	14~110	页黄壤、麻红壤、片赤红壤、酸性紫色土
C	在完全湿润的条件下土壤具有较低的渗透率。此类土壤大多在一定深处有不透水层，下渗和导水能力较低。	1.4~14	潴育水稻土、页红壤、麻赤红壤、页赤红壤、侵蚀赤红壤、赤红壤
D	在完全湿润的条件下土壤具有很低的渗透率。此类土壤主要为黏土，涨水能力强，大多有永久水位线，导水能力很低。	< 1.4	——

4 结果分析

4.1 下垫面对地表产流影响

本文选取坡度、土地利用类型和土壤类型3个要素来表征五华河流域下垫面的基本情况（图2）。从图2看出，五华河流域下垫面条件较为复杂。从地形上看（图2a），五华

河流域坡度大部分在0°~15°之间，少量的较陡坡（15°~25°）、陡坡（25°~35°）主要分布在流域西南侧的登云、通衢、紫市、潭下及长布一带的山地，极少量大于35°的急陡坡分布于长布镇西南地区，流域地形整体呈现东北平缓、西南陡峭的趋势。从土地利用类型上看（图2b），五华河流域土地利用类型以林地为主，林地面积共占流域面积的77%，其中有林地占流域面积的62%，灌木林地、疏林地和其他林地分别占流域面积的1%、6%和8%。耕地面积次之，约占流域面积的19%，其中水田、旱地分别占流域面积的15%、4%，耕地主要沿河道分布。草地、水域和建设用地面积较小，分别仅占流域面积的2%、1%和1%，空间分布上草地和水域在流域内呈零星状分布，建设用地主要分布在流域的南部并靠近河流。从土壤类型上看（图2c），流域的土壤类型主要以赤红壤为主，占流域面积的71%，其中赤红壤、片赤红壤、页赤红壤、麻赤红壤和侵蚀赤红壤面积分别占流域面积的5%、3%、22%、18%和23%，在通衢、潭下及其以东的地区广泛分布。水稻土、红壤面积次之，分别占流域面积的16%和9%，空间分布上水稻土靠近河流分布，

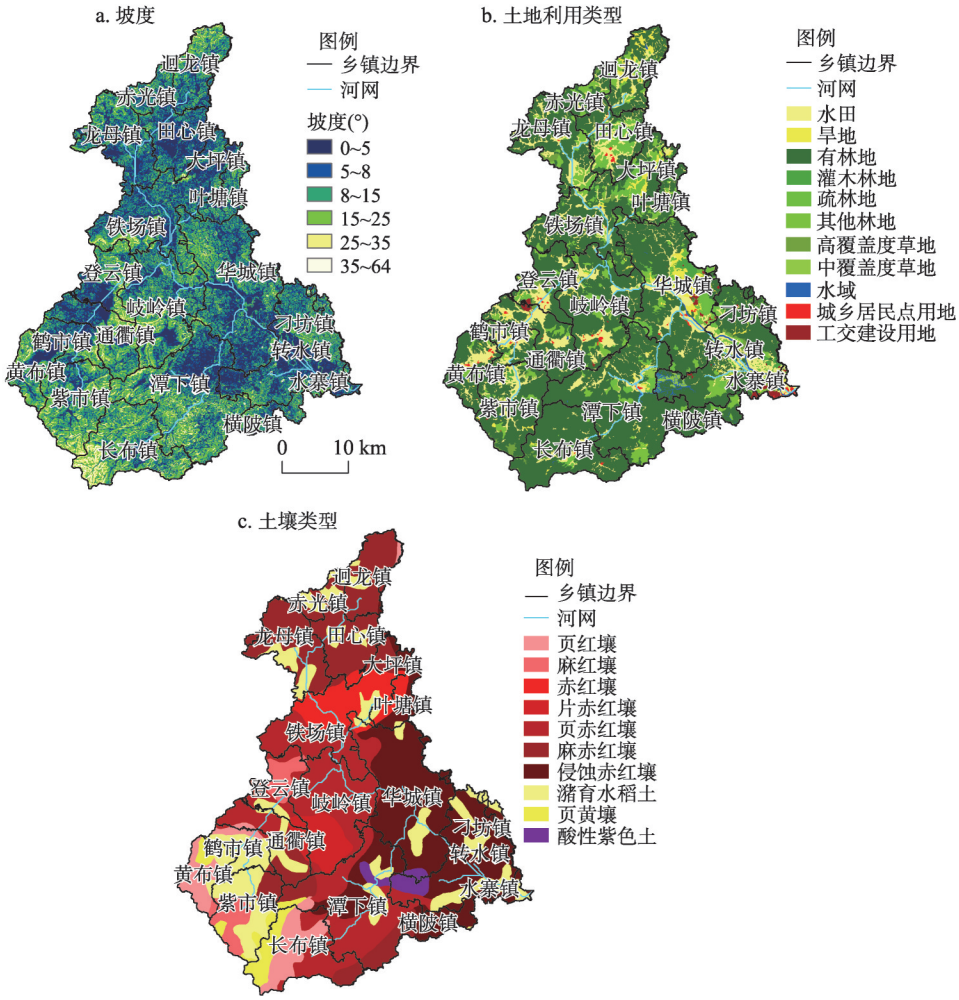

图2　五华河流域下垫面条件

Fig. 2　The conditions of underlying surface in Wuhua River Basin

红壤主要分布于登云、黄布、紫市、长布一带。页黄壤和酸性紫色土数量较少，面积仅占流域面积的3%和1%，页黄壤主要分布于黄布与鹤市边界、紫市与长布边界地区，酸性紫色土主要分布于潭下、转水、华城三镇交界处。

下垫面对地表产流的影响用*TWI*和CN值来评价。从图3a可见，五华河流域*TWI*主要集中在5.09~8.05的范围内，*TWI*在−23.67~5.09范围内的地区较少且分布分散，*TWI*在8.05~44.87范围内的空间分布与河道的空间位置基本一致，呈“人”形贯穿整个流域。由图3b可见，五华河流域80%以上的区域CN值在70~77之间。CN值为55的低值区域主要分布于登云、岐岭、黄布、紫市、长布等地，为有林地、中等渗透率土壤覆盖区域。CN值大于80的区域在流域内呈小范围零散状分布，为建设用地和水域、较低渗透率土壤覆盖区域。由图3c可见，五华河流域在下垫面（地形、土地利用类型、土壤类型）的影响下产流差异较大，低产流区主要分布在流域西南部的登云、岐岭、黄布、紫市、长布一带，与CN值低的区域基本吻合，表现出林地和透水性较好的土壤类型对地表产流的强烈抑制作用，地形因素的抑制作用不明显。高产流区与地形湿度指数在8.05~44.87

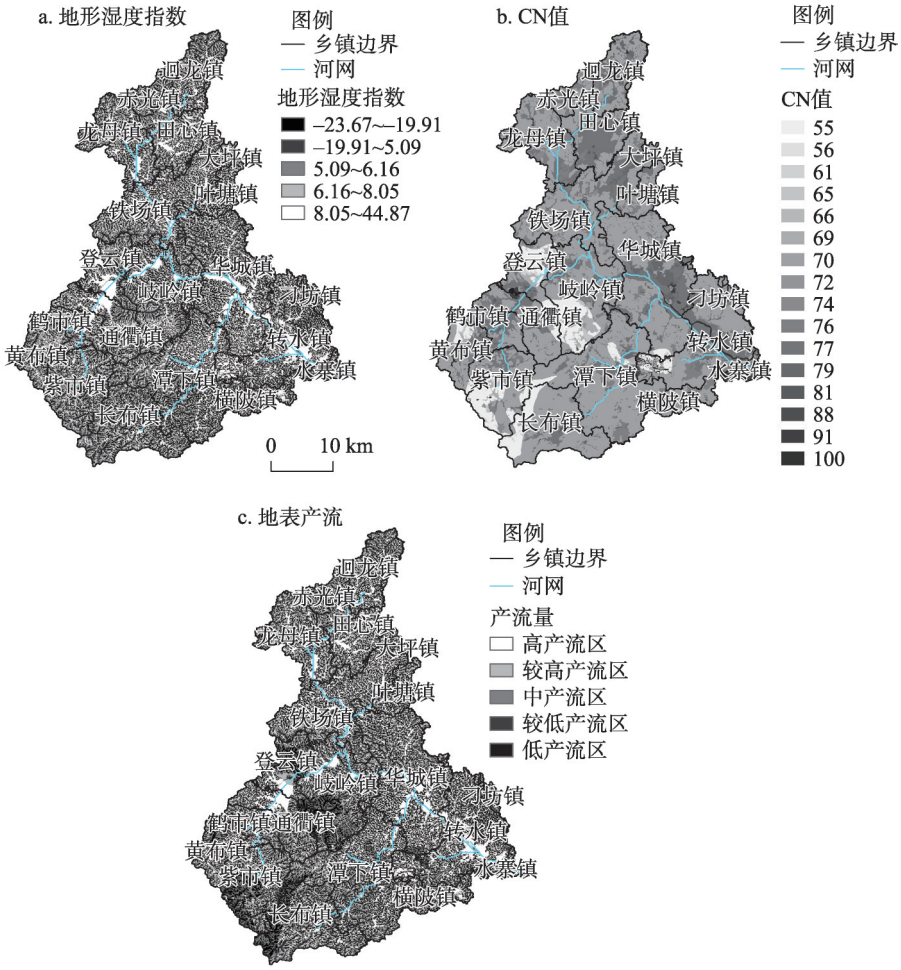

图3 五华河流域下垫面性质影响下地表产流空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of runoff yield affected by underlying surface in Wuhua River Basin

范围内的区域基本一致，呈“人”形分布，表现出地形因素对地表产流的强烈促进作用，土地利用、土壤因素的促进作用不明显。

4.2 非点源污染风险区识别

按照3.2小节的方法，利用自然断点法将流域非点源污染风险区分为5级（图4）。高风险区（阻力距离为0~3195）分布于迴龙、田心、龙母、铁场、登云、通衢、鹤市、紫市、岐岭、华城、转水、潭下、水寨等地的河道两岸，区内大面积的耕地、建设用地形成极高的污染负荷，加上水文现象活跃，大量的污染物质经快速迁移后进入河流，对河流水质形成决定性的影响。次级风险区（阻力距离为3195~7918）邻近高风险区分布，这部分区域与大面积的耕地和建设用地有一定的距离，污染负荷产出程度有所降低，但下垫面产流丰富，污染物迁移活跃，少量污染物质会进入河流对水体造成污染。过渡区（阻力距离为7918~13613）距高污染负荷地区较远，水文现象相对不那么活跃，为污染风险区和生态安全区的过渡地带。弱生态安全区（阻力距离为13613~20699）和生态安全区（阻力距离> 20699）主要分布于远离高污染负荷区或河流的长布、潭下北部、横陂西部及铁场与叶塘、登云交界等部分地区，这些区域产生的污染负荷量极小，且水文现象不活跃，地表产流能力低，污染物迁移受到抑制，或污染物迁移至河流的距离较远，污染物质能够到达河流并对河流水体造成污染的可能性极小。

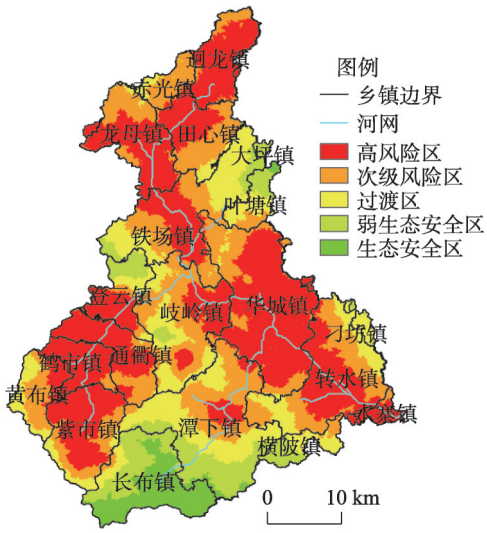

图4　五华河流域非点源污染风险区

Fig. 4　Non-point source pollution risk area in Wuhua River Basin

4.3 非点源污染风险路径识别

由于耕地污染以化肥、杀虫剂和除草剂污染为主，建设用地污染以工业、生活垃圾污染为主，不同源地造成的污染差异较大，在进行实际治理时，需要针对不同的污染情况采取不同的方案，为此须将不同源地类型的非点源污染风险路径分开，逐一进行研究分析。

运用最小累积阻力模型分别获得两种不同类型源地到河道的最小累积阻力路径，即非点源污染风险路径，计算每一条路径的通过阻力，将通过阻力按从小到大分为1~5级，断点依次为0、500、5000、10000，计算每一级风险路径的数量和数量百分比（表4）。由表4可知，以耕地为“源”的风险路径有3080条，以建设用地为“源”的风险路径有2855条，可见耕地非点源污染风险路径的数量要大于建设用地非点源污染风险路径的数量。耕地非点源污染风险路径通过阻力最大值为38632.7，建设用地非点源污染风险路径通过阻力最大值为65109.8，可见在路径通过阻力最大值上，耕地非点源污染风险路径要小于建设用地非点源污染风险路径。由此表明，以耕地为源的非点源污染风险路径不仅数量多，而且入河阻力小，耕地形成的非点源污染更容易对水体造成污染。以建设用地为源的非点源污染风险路径数量相对较少，且入河阻力相对较大，建设用地形成的非点源污染对水质影响相对较小。

从各等级风险路径数量及百分比分布情况来看，以耕地为“源”的非点源污染风险路径中，1级路径数量最多，有1516条，占耕地总路径数量的49.22%。2级路径、3级路

表4 最小累积阻力值

Tab. 4 Minimum cumulative resistance value

最小累积阻力值(C)	耕地为源		建设用地为源	
	路径数	百分比(%)	路径数	百分比(%)
1级(C=0)	1516	49.22	34	1.19
2级(0 < C≤500)	427	13.86	68	2.38
3级(500 < C≤5000)	385	12.50	628	22.00
4级(5000 < C≤10000)	342	11.11	527	18.46
5级(C > 10000)	410	13.31	1598	55.97
总计	3080	100.00	2855	100.00
路径阻力最大值(C_{max})	38632.7		65109.8	

径、4级路径数量依次为427条、385条、342条，各占耕地总路径数量的13.86%、12.50%、11.11%。1~4级的耕地风险路径数量共占了总数的86.69%，5级路径的数量为410条，比例仅占13.31%。可见近半的耕地非点源污染风险路径通过阻力为零，化肥、农药等农业污染物质基本不受下垫面作用直接进入水体对水体造成严重污染。绝大多数的耕地非点源污染风险路径通过阻力较小，仅少数路径受到阻力较大，表明耕地形成的非点源污染极易迁移进入水体对水体造成显著影响。与耕地非点源污染风险路径相反，以建设用地为“源”的非点源污染风险路径中数量比例最大的为5级路径，共1598条，其比例达55.97%。2级路径、3级路径、4级路径数量分别为68条、628条、527条，占建设用地非点源污染风险路径总数的2.38%、22.00%、18.46%。1级路径数量最少，只有34条，比例仅占1.19%。表明建设用地形成的大部分非点源污染在迁移过程中受下垫面阻碍作用强烈，随着路径阻力等级的降低，相应的路径数量也不断减少，而完全不受下垫面阻力的建设用地非点源污染风险路径数量极少，建设用地形成的非点源污染对水体的影响相对较小。

由图5a可见，大面积的耕地呈长条发散状邻近河道分布，耕地越邻近河流产生的1级路径越多，其通过阻力值为0，这部分河流极易直接遭受周边农业污水的侵入，且因耕地沿河分布，使污水的可能入河地点沿河流紧密分布，治理此类污染不应采取对关键源区进行面状整治的措施，而应在邻近耕地的河道两岸建立一定宽度的植被缓冲区，防止农业污水直接进入河流。从图5b可看出，在以建设用地为“源”的非点源污染的影响下，以登云、岐岭、华城为界，南部产生的建设用地非点源污染风险路径主要为2~3级，而北部产生的非点源污染风险路径主要为4~5级，表明由于流域南部大规模城镇的聚集，南部更易形成进入河流的低阻力风险路径，南部河流比北部更易受到建设用地污染物质的影响。总体来看，建设用地形成的1级非点源污染风险路径极少，绝大部分污染物质经受下垫面作用之后才会进入河流，对此类非点源污染可以就关键源区展开污染物拦截、转化等措施，从而达到遏制非点源污染的效果。

值得注意的是，在紫市、长布、岐岭分布有长距离的1级耕地风险路径，在华城、叶塘两处存在长距离的1级建设用地风险路径，这些区域的污染物极有可能会跨过距离较长的下垫面后进入河流，所产生的污染物质不仅会影响附近河道，还会随地表径流到达其他支流河道，造成对其他河道水质和迁移路径下垫面环境的污染。尤其是位于长布镇的长距离污染物质迁移路径，因其处于生态安全区而极易遭到忽略，导致长布镇很大程度上面临一系列生态水体安全问题。而建设用地易发生重金属污染，在建设用地风险

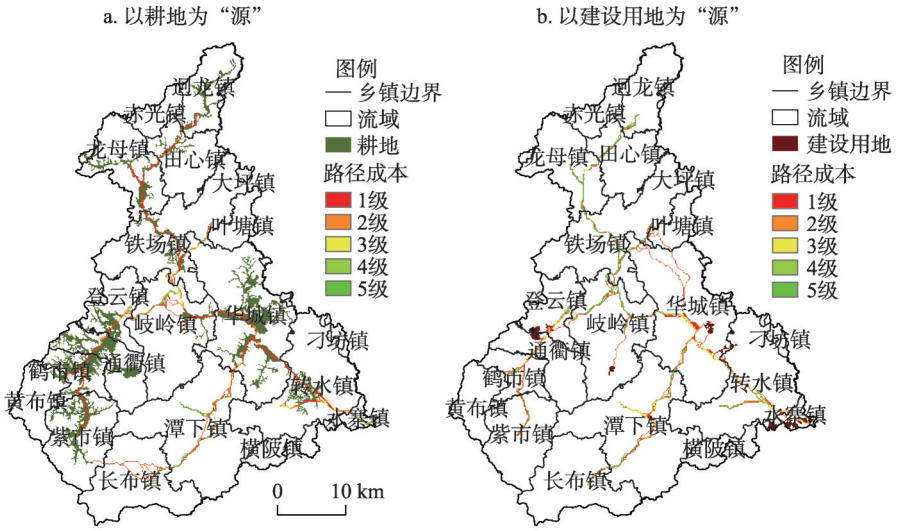

图5　五华河流域非点源污染风险路径

Fig. 5　Non-point source pollution risk path in Wuhua River Basin

路径上不宜种植食用作物，防止作物对重金属物质的吸收进而危害人体，可以在该路径上种植利于污染物降解转化的植被，从而阻止污染物迁移。

4.4 结果验证

为验证本研究方法的合理性，根据4.3小节的结果，在耕地污染物入河阻力小的河子口和建设用地污染物入河阻力小的五华河口分别取水样进行水质检测（图6），检测内容包括电导率、悬浮物、硫酸盐、溶解氧、六价铬和总磷。使用雷磁JPB-607A便携式溶解氧测定仪现场进行溶解氧的检测，使用XZ-0142多参数水质分析仪当天在实验室进行悬浮物、硫酸盐、六价铬和总磷的检测。检测结果如表5所示。

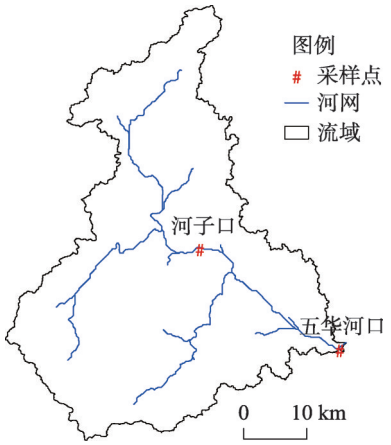

图6　五华河流域水样采集点

Fig. 6　The distribution of sampling points

表5　水样检测结果(mg/L)

Tab. 5　The test results of water samples (mg/L)

水样采集点	溶解氧	悬浮物	硫酸盐	六价铬	总磷
河子口	5.5	16.06	22.5	0.09	0.06
五华河口	5.4	27.71	87.58	0.18	0.02

由表5分析可得，河子口的总磷含量是0.06 mg/L，五华河口的总磷是0.02 mg/L，河子口的总磷含量比五华河口的总磷含量高。而河子口的溶解氧、悬浮物、硫酸盐和六价铬的含量分别是5.5 mg/L、16.06 mg/L、22.5 mg/L、0.09 mg/L，五华河口的溶解氧、悬浮物、硫酸盐和六价铬的含量分别是5.4 mg/L、27.71 mg/L、87.58 mg/L、0.18 mg/L，除溶解氧外，河子口的悬浮物、硫酸盐和六价铬的含量均比五华河口的悬浮物、硫酸盐和六价铬的含量低。耕地因为化肥的施用，所造成的非点源污染主要以总磷含量过高为主，而建设用地因为工厂及生活垃圾的

影响，所造成的非点源污染则以悬浮物、含硫盐类和重金属为主。可见，在河子口处水质主要受到了耕地的影响，而五华河口处水质则主要是受到了建设用地的影响。这一结果与模拟的结果吻合。

5 结论与讨论

现有的研究对于非点源污染风险区识别的研究较多[12, 20]，而对于非点源污染风险路径的探究较少，为此，本文运用了最小累积阻力模型，以高污染负荷的地区为“源”，下垫面产流性质为阻力面，对五华河流域非点源污染风险区和风险路径进行识别研究，得出以下结论：

（1）用最小累积阻力模型识别非点源污染风险区和风险路径，数据量要求低，操作简单，能够有效的对流域内的风险区和风险路径进行提取和分析。

（2）五华河流域下垫面条件差异较大造成其产流性质差异较大，受林地和透水性较好的土壤类型对地表产流的强烈抑制作用，低产流区主要分布在流域西南部的登云、岐岭、黄布、紫市、长布一带；在地形因素对地表产流的强烈促进作用下，高产流区贯穿流域呈人字形长条状分布。

（3）五华河流域非点源污染高风险区分布于迴龙、田心、龙母、铁场、登云、通衢、鹤市、紫市、岐岭、华城、转水、潭下、水寨等地的河道两岸，在地形、土地利用类型和土壤类型的共同作用下，随着与耕地、建设用地及河道距离的增加，高风险区逐渐过渡为生态安全区。

（4）五华河流域范围内耕地中的富营养物质和沉积物更容易随地表径流进入受纳水体，耕地对五华河水质的影响要大于建设用地。

（5）以耕地为“源”的风险路径和以建设用地为“源”的风险路径在阻力、长度、形态和污染物质方面都存在较大差异，对不同源地的非点源污染治理应采取不同的措施。治理以耕地为“源”的非点源污染宜在紧挨耕地的河流两岸建立一定宽度的植被缓冲区，治理以建设用地为“源”的非点源污染则宜围绕关键源区开展治理。

本研究对五华河流域进行风险区和风险路径识别，有利于今后对五华河流域非点源污染进行针对性治理，为五华河流域进一步进行景观格局优化提供理论依据，并为流域非点源污染风险区和风险路径的识别提供一种新的思路。但是本研究对这一方法的应用上还存在一些不足。首先是对于“源”的选取，本研究是基于流域的实际情况和已有的相关研究设定阈值，选取大于阈值的水田、旱地和建设用地作为“源”，在阈值的设定上具有一定的主观性。另外，CN值是基于美国的实际情况提出来的，在中国范围内直接运用会不可避免的造成误差。在资金和实验室设备的限制下，只采集了两个典型地区的水样进行了主要的水质检测，实地验证不够全面，有待于以后进行进一步的实证研究。

参考文献(References)

[1] Li Xiaoran, Li Yangbing, Shao Jingan. A study on the response of non-point source pollution to the variation of land use and social economy. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6050-6061. [李潇然, 李阳兵, 邵景安. 非点源污染输出对土地利用和社会经济变化响应的案例研究. 生态学报, 2016, 36(19): 6050-6061.]

[2] Yin Cai, Liu Miao, Sun Fengyun, et al. Influencing factors of non-point source pollution of watershed based on boosted regression tree algorithm. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 911-919. [尹才, 刘淼, 孙凤云, 等. 基于增强回归树的流域非点源污染影响因子分析. 应用生态学报, 2016, 27(3): 911-919.]

[3] Dowd B M, Press D, Huertos M L. Agricultural nonpoint source water pollution policy: The case of California's Central

Coast. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 128(3): 151-161.

[4] Huang Ning, Wang Hongying, Lin Tao, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for non-point source pollution control based on 'source-sink' theory: A case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen City, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3325-3334. [黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源—汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架: 以厦门市马銮湾流域为例. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3325-3334.]

[5] Li Zhuheng, Liu Miao, Li Chunlin, et al. Non-point source pollution simulation under land use change scenarios in Hun-Taizi River Watershed. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2891-2898. [李铸衡, 刘淼, 李春林, 等. 土地利用变化情景下浑河—太子河流域的非点源污染模拟. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2891-2898.]

[6] White M J, Storm D E, Busteed P R, et al. Evaluating nonpoint source critical source area contributions at the watershed scale. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(4): 1654-1663.

[7] Zhou H, Gao C. Assessing the risk of phosphorus loss and identifying critical source areas in the Chaohu Lake Watershed, China. Environmental Management, 2011, 48(5): 1033-1043.

[8] Zhou Huiping, Gao Chao, Zhu Xiaodong. Identification of critical source areas: An efficient way for agricultural non-point source pollution control. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3368-3374. [周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374.]

[9] Sivertun Å, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gisselö Watershed using GIS. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(10): 887-898.

[10] Endreny T A, Eric F W. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 39(1): 165-181.

[11] Hughes K J, Magette W L, Kurz I. Identifying critical source areas for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes. Journal of Hydrology, 2005, 304(1-4): 430-445.

[12] Niraula R, Kalin L, Srivastava P, et al. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. Ecological Modelling, 2013, 268(23): 123-133.

[13] Wang Niu, Lu Haiming, Zhou Ying, et al. Identifying critical source areas of non-point source phosphorus export based on topographic index. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 12-16. [王妞, 陆海明, 邹鹰, 等. 基于地形指数的流域非点源磷素输出关键源区识别. 水文, 2016, 36(2): 12-16.]

[14] Liu Jie, Ye Jing, Yang Wan, et al. A GIS-based landscape pattern optimization approach for Lake Dianchi Watershed. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 801-808. [刘杰, 叶晶, 杨婉, 等. 基于GIS的滇池流域景观格局优化. 自然资源学报, 2012, 27(5): 801-808.]

[15] Dong J, Dai W, Shao G, et al. Ecological network construction based on minimum cumulative resistance for the city of Nanjing, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2045-2060.

[16] Blazquez-Cabrera S, Gastón A, Beier P, et al. Influence of separating home range and dispersal movements on characterizing corridors and effective distances. Landscape Ecology, 2016, 31(10): 2355-2366.

[17] Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu City based on the framework of importance-sensitivity-connectivity. Geographical Research, 2017, 36(3): 471-484. [陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.]

[18] Wang J, Shao J, Wang D, et al. 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.

[19] Fu Yonghu. The theory and patterns for designing dematerialization and low environmental risk land-use system in intensive agricultural area [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. [付永虎. 高集约化农区投入减量化与低环境风险的土地利用系统设计: 理论与模式[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.]

[20] Djodjic F, Villa A. Distributed, high-resolution modelling of critical source areas for erosion and phosphorus losses. Ambio, 2015, 44(2): 241-251.

[21] Liu Jie, Pang Shujiang, He Yangyang, et al. Critical area identification of phosphorus loss based on runoff characteristics in small watershed. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 241-249. [刘洁, 庞树江, 何杨洋, 等. 基于小流域产流特征的磷流失关键源区识别. 农业工程学报, 2017, 33(20): 241-249.]

[22] Soil Survey Office of Guangdong Province. Soil Type Database of Guangdong. Beijing: Science Press, 1996. [广东省土壤普查办公室. 广东土种志. 北京: 科学出版社, 1996.]

[23] Zhang Jiping, Qiao Qing, Liu Chunlan, et al. Ecological land use planning for Beijing City based on the minimum cumulative resistance model. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6313-6321. [张继平, 乔青, 刘春兰, 等. 基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究. 生态学报, 2017, 37(19): 6313-6321.]

[24] Li Kai, Zeng Fantang, Fang Huaiyang, et al. Analysis on nitrogen and phosphorus loading of non-point sources in Shiqiao River Watershed based on L-THIA model. Environmental Science, 2013, 34(11): 4218-4225. [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. 环境科学, 2013, 34(11): 4218-4225.]

[25] Chen L, Tian H, Fu B, et al. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale. Chinese Geographical Science, 2009, 19(1): 37-45.

[26] Li Hengpeng, Liu Xiaozheng, Huang Wenyu. The non-point output of different landuse types in Zhexi hydraulic region of Taihu Basin. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 401-408. [李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出. 地理学报, 2004, 59(3): 401-408.]

[27] Zhong Jianbing, Shao Jingan, Yang Yuzhu. Characteristics of non-point source pollution load of crop farming undergoing the background of livelihood diversification. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1201-1214. [钟建兵, 邵景安, 杨玉竹. 生计多样化背景下种植业非点源污染负荷演变. 地理学报, 2016, 71(7): 1201-1214.]

[28] Walter M T, Walter M F, Brooks E S, et al. Hydrologically sensitive areas: Variable source area hydrology implications for water quality risk assessment. Journal of Soil & Water Conservation, 2000, 55(3): 277-284.

[29] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape & Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.

[30] Deng Jinjie, Chen Liuxin, Yang Chengyun, et al. Significance evaluation of ecological corridor in an highly-urbanized areas: A case study of Shenzhen. Geographical Research, 2017, 36(3): 573-582. [邓金杰, 陈柳新, 杨成韫, 等. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索: 以深圳为例. 地理研究, 2017, 36(3): 573-582.]

[31] Wang Jinliang, Xie Deti, Shao Jing'an, et al. Identification of source-sink risk pattern of agricultural non-point source pollution in cultivated land in Three Gorge Reservoir Area based on accumulative minimum resistance model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 206-215. [王金亮, 谢德体, 邵景安, 等. 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.]

[32] Guo Hongbin, Huang Yixiong, Ye Gongfu, et al. A study on the evaluation and optimization of urban ecological function network in Xiamen. Journal of Natural Resources, 2010, 25(1): 71-79. [郭宏斌, 黄义雄, 叶功富, 等. 厦门城市生态功能网络评价及其优化研究. 自然资源学报, 2010, 25(1): 71-79.]

[33] Ye Yuyao, Su Yongxian, Zhang Hongou, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4): 485-496. [叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.]

[34] Yu Qiqiang, Yue Depeng, Di Y, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 330-336. [于强, 岳德鹏, Di Y, 等. 基于BCBS模型的生态节点布局优化. 农业机械学报, 2016, 47(12): 330-336.]

[35] Zhang Qibin. Study on landscape pattern construcion optimization scheme of Dengkou County [D]. Beijing Forestry University, 2016. [张启斌. 磴口县景观格局建设优化方案研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.]

[36] Zhang Caixia, Yang Qinke, Li Rui. Advancement in topographic wetness index and its application. Progress in Geography, 2005, 24(6): 116-123. [张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于DEM的地形湿度指数及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116-123.]

[37] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.

[38] Thomas I A, Jordan P, Mellander P E, et al. Improving the identification of hydrologically sensitive areas using LiDAR DEMs for the delineation and mitigation of critical source areas of diffuse pollution. Science of the Total Environment, 2016, 556(6): 276-290.

[39] Xu Yan, Pan Wenbin. SCS model for watershed runoff calculation in ArcView. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 176-179. [许彦, 潘文斌. 基于ArcView的SCS模型在流域径流计算中的应用. 水土保持研究, 2006, 13(4): 176-179.]

[40] Cai Yongming, Zhang Keli, Li Shuangcai. Study on the conversion of different soils texture. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 511-517. [蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.]

[41] Chen Lajiao. Simulation of runoff and sediment yield by land use/cover change based on SWAT model: A case study of Malian River in Longdong [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2006. [陈腊娇. 基于SWAT模型的土地利用/覆被变化产流产沙效应模拟: 以陇东马莲河流域为例[D]. 金华: 浙江师范大学, 2006.]

[42] He Wei. Study on the application of the SWAT model in the watershed on Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. [贺维. SWAT模型在晋西黄土区小流域中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.]

Identifying risk areas and risk paths of non-point source pollution in Wuhua River Basin

CHEN Yuchan[1], ZHANG Zhengdong[1], WAN Luwen[2], ZHANG Jie[1], YANG Chuanxun[3], YE Chen[1], LI Qingpu[1]

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Department of Earth and Environmental Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA; 3. Guangzhou Institute of Geography,Guangzhou 510070,China)

Abstract: Non-point source pollution is one of the most severe problems impacting water environments. Identifying potential risk areas and risk paths contributing to non-point source pollution is the soution to this problem. This study introduces the minimum cumulative resistance model of landscape ecology, which is based on land use and soil mapping at a scale of 1∶100000 and DEM data with a resolution of 30 m. The model takes high pollution-loaded cultivated land and construction land as the main sources and uses the Topographic Wetness Index and Runoff Curve Numbers, which can describe the underlying resistance surface runoff yield characteristics, to visually identify and analyze the risk areas and risk paths of the Wuhua River Basin. The results show that underlying surface runoff production results in low-yield flow areas that are mainly concentrated in the southwest of the basin, while high-yield flow areas herringbone throughout the study area. The minimum cumulative resistance model can effectively identify the risk areas and risk paths in this basin. The high-risk areas of non-point source pollution are mainly distributed in Jionglong, Tianxin, Longmu, Tiechang, Dengyun, Tongqu, Heshi, Zishi, Qiling, Huacheng, Zhuanshui, Tanxia and Shuizai, which are located along both sides of the river. The spatial distributions of the risk paths of cultivated land and construction land are significantly different. The effects of cultivated land on water quality of the river are greater than those of construction land on it, and the nutrients and sediments from cultivated land are more likely to run into the receiving water via surface runoff. Vegetation buffer zones should be set up on both sides of the river adjacent to cultivated land when we deal with non-point source pollution that originates from cultivated land, and the harnessment of non-point source pollution originating from construction land should be monitored around major source areas. This study provides a novel method for the identification of source areas and risk paths of non-point source pollution and a theoretical basis to formulate future management strategies.

Keywords: non-point source pollution; risk areas identification; risk paths identification; minimum cumulative resistance model; Wuhua River Basin