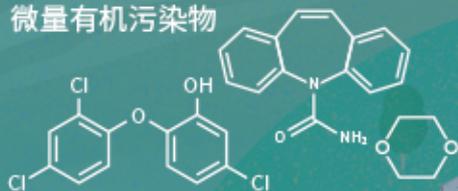


### 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

#### 微量有机污染物



#### 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期

Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

# 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析

李华林<sup>1</sup>, 张建军<sup>1</sup>, 张耀方<sup>2</sup>, 常国梁<sup>2</sup>, 时迪迪<sup>1</sup>, 徐文静<sup>1</sup>, 宋卓远<sup>1</sup>, 于佩丹<sup>1</sup>, 张守红<sup>1,3\*</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 3. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 非点源污染已成为影响水生态环境和人类健康的重要因素之一, 而解析非点源污染风险时空变化特征是非点源污染治理的重要前提. 基于 1980~2020 年土地利用数据, 采用潜在非点源污染指数 (potential non-point pollution index, PNPI) 模型探究基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征. 结果表明: ① 流域潜在非点源污染风险呈东南部高西北部低的空间特征. 研究时序内流域潜在非点源污染极高和高风险区面积呈减少趋势, 极高和高风险区主要土地利用类型由旱地、水田和果园逐渐变为城镇用地和农村居民地. ② 均方差决策法、熵值法、变异系数法和专家打分法均得出土地利用指标权重最大, 平均权重分别为 0.46、0.53、0.45 和 0.48, 而不同赋权方法确定的径流指标和距离指标权重差异较大, 得出的各非点源污染风险等级区的面积占比差异也较大. ③ 指数函数法通过构建土地利用指标、径流指标和距离指标的指数函数描述源因子与运输因子之间的关系, 输出结果更符合流域非点源污染风险空间分布特征, 极低和极高风险区面积占比分别为 54.22% 和 6.23%. 以上结果可为流域非点源污染风险分析及治理提供科学参考.

**关键词:** 北运河上游; 非点源污染; 风险分区; PNPI 模型; 指数函数法; 权重

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2796-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010225

## Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods

LI Hua-lin<sup>1</sup>, ZHANG Jian-jun<sup>1</sup>, ZHANG Yao-fang<sup>2</sup>, CHANG Guo-liang<sup>2</sup>, SHI Di-di<sup>1</sup>, XU Wen-jing<sup>1</sup>, SONG Zhuo-yuan<sup>1</sup>, YU Pei-dan<sup>1</sup>, ZHANG Shou-hong<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Water Science Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Non-point source pollution has become an important factor affecting the aquatic ecological environment and human health, and the analysis of spatial-temporal variations in non-point source pollution risks is an important prerequisite for pollution control. Based on land-use and land-cover data from 1980 to 2020, the potential non-point source pollution index (PNPI) model was applied in the upper Beiyun River Basin using different weighting methods. The results showed that: ① The potential risk of non-point source pollution is high in the southeast and low in the northwest of the basin. Between 1980 and 2020, the total area of extremely high-risk and high-risk non-point source pollution regions showed a decreasing trend, and the main types of land use for extremely high-risk and high-risk regions gradually evolved from paddy fields, drylands, and orchards to urban and rural residential land; ② The weighting of the land use index determined by the mean-square deviation decision, entropy, coefficient of variation, and expert scoring methods was largest among the three PNPI indices, with average weightings of 0.46, 0.53, 0.45, and 0.48, respectively. However, the weightings for runoff and distance indices determined by different weighting methods were notably different, and the proportions of regions with different levels of non-point source pollution risk also varied; ③ The exponential function method, which describes the relationship between source factors and transport factors by constructing the exponential functions of land use, runoff, and distance indices, provided results that are more consistent with the spatial distribution characteristics of non-point source pollution risk in the basin. The proportions of extremely low-risk and extremely high-risk regions are 54.22% and 6.23%, respectively. These results provide scientific reference for risk analysis and the control of non-point source pollution in this basin.

**Key words:** upper Beiyun River basin; non-point source pollution; risk zoning; PNPI model; exponential function method; weights

非点源污染是全球水环境治理面临的严峻挑战之一, 防治非点源污染是我国目前水体污染控制与治理的重点方向<sup>[1,2]</sup>. 非点源污染关键源区的识别是非点源污染治理的关键<sup>[3]</sup>、而非点源污染负荷和风险评估是识别非点源污染关键源区的前提条件<sup>[4]</sup>. 目前, 针对非点源污染研究主要以污染物负

荷核算的定量研究和非点源污染风险评估的定性研究两个方面开展. 国内外非点源污染负荷定量研究

收稿日期: 2020-10-31; 修订日期: 2020-11-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2017ZX07102-001)

作者简介: 李华林(1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域综合治理, E-mail: lihualin@bjfu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: zhangs@bjfu.edu.cn



地势高东南部地势平坦的特征。

## 1.2 数据来源

本文数据主要有流域边界矢量数据,来源于北京市水科学技术研究院;乡镇边界矢量数据,来源于北京市昌平区水务局;30 m DEM 栅格数据和土壤类型矢量数据均来自于北京市水科学技术研究院;1980、1990、2000、2010 和 2020 年这 5 期土地利用数据来源于地理国情监测云平台,空间分辨率均为 30 m。利用人工目视解译的方法对五期数据进行验证和修订,形成水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、果园、高覆盖度草地、中覆盖度草地、河渠、水库坑塘、城镇用地、农村居民点和其它建设用地这 13 个二级分类土地利用数据(图 2)。

## 1.3 研究方法

PNPI 模型通过将非点源污染的产生、迁移和降解这 3 个过程简化为土地利用指标(LCI)、径流

指标(ROI)和距离指标(DI)模拟分析区域非点源污染风险。每个像元的潜在非点源污染风险 PNPI 值为土地利用、径流和距离这 3 个指标的函数:

$$PNPI = a \times LCI + b \times ROI + c \times DI$$

式中, $a$ 为 LCI 系数, $b$ 为 ROI 系数, $c$ 为 DI 系数。

本文首先采用均方差决策法、熵值法、变异系数法、专家打分法和指数函数法计算流域潜在非点源污染风险;然后用 Jenks 自然间断点分级法对流域非点源污染风险进行分区;最后用斜率法表征流域非点源污染风险的时间变化趋势;综合上述方法探究基于不同赋权方法的北运河上游流域非点源污染风险时空变化特征。

### 1.3.1 PNPI 模型

土地利用指标(LCI)表示不同土地利用方式对受纳水体造成潜在非点源污染的风险<sup>[4]</sup>。土地利用指标越高,其潜在污染风险越高。该指标值由生态学

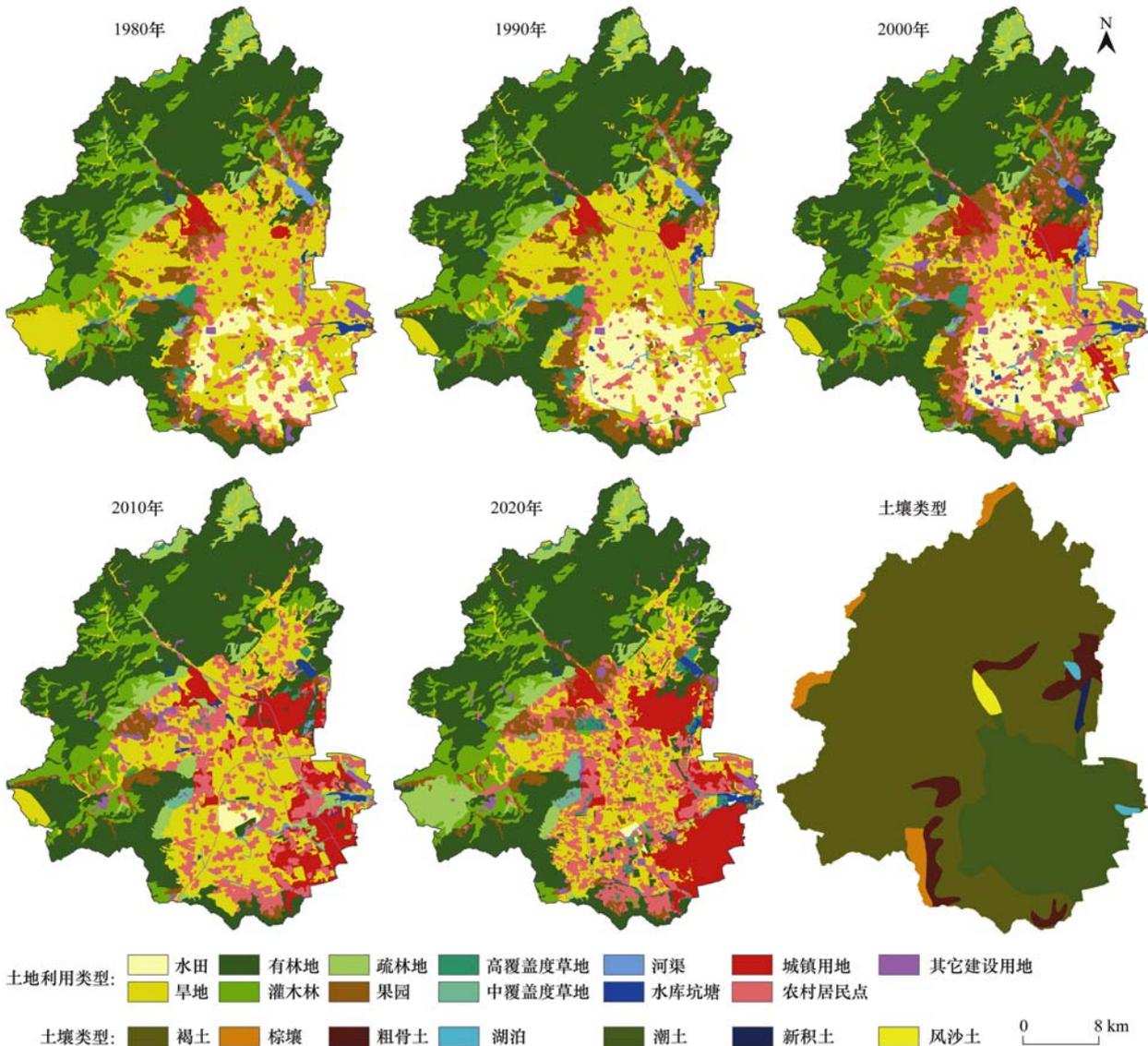


图 2 1980~2020 年北运河上游流域土地利用和土壤类型

Fig. 2 Land use and soil types in the upper Beiyun River basin from 1980 to 2020

家、生物学家、自然科学家和环境工程师等领域的众多专家根据不同土地利用方式所造成的污染潜力打分(0~10)得出. 本研究参考时迪迪等<sup>[4]</sup>和 Cecchi 等<sup>[24]</sup>的研究成果, 筛选出本研究区土地利用指标(表1).

径流指标(ROI)表示地形、土地利用和土壤类型对污染物在运输过程中的渗漏、过滤和阻碍等作用, 由每个单元格的坡度、土壤类型和土地利用方式共同决定. 径流指标越高, 表征径流非点源污染负荷损失越低, 最终进入收纳水体的污染物越多, 污染风险越高. 径流指标值为像元到达受纳水体所经过

所有土地单元径流系数的平均值<sup>[4,23,24]</sup>, 本文参考 Cecchi 等<sup>[24]</sup>提供的径流系数(表1)对像元的初始径流系数进行赋值, 然后进行坡度矫正(表2), 土壤渗透等级参考车振海<sup>[28]</sup>的研究成果(表3).

距离指标(DI)表示土地单元到达受纳水体的水力长度. 污染物距离水体越远, 在迁移过程中降解作用影响越小, 污染风险越高. 距离指标计算公式为:

$$DI_i = \exp[-(D_i \times k)] \quad (1)$$

式中,  $D_i$  为第  $i$  个单元格到受纳水体的水力距离, 用单元格数表示;  $k$  为常量, 本文取值为 0.090533<sup>[24]</sup>.

表1 土地利用指标和径流系数<sup>[4,23,24]</sup>

Table 1 LCI and runoff coefficients

土地利用类型	土地利用指标值	标准差	径流系数			
			A	B	C	D
水田	7.67	1.80	0.90	0.90	0.90	0.90
旱地	6.33	2.50	0.70	0.80	0.86	0.90
有林地	0.44	0.88	0.36	0.60	0.73	0.79
灌木林	0.56	1.01	0.49	0.69	0.79	0.84
疏林地	0.78	1.09	0.36	0.60	0.73	0.79
果园	7.89	2.26	0.45	0.66	0.77	0.83
高覆盖度草地	4.00	2.35	0.3	0.58	0.71	0.78
中覆盖度草地	1.94	2.27	0.49	0.69	0.79	0.84
水库坑塘	0.14	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
河渠	0.14	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00
滩地	0.78	1.64	0.76	0.85	0.89	0.91
城镇用地	8.22	2.22	0.77	0.85	0.90	0.92
农村居民点	6.89	1.36	0.57	0.72	0.81	0.86
其它建设用	7.22	2.54	0.46	0.69	0.79	0.84

表2 坡度校正表<sup>[4]</sup>

Table 2 Slope correction coefficients

坡度	修正系数	坡度	修正系数	坡度	修正系数
<2°50'	0.0	5°23'~6°14'	0.4	8°47'~9°38'	0.8
2°50'~3°41'	0.1	6°14'~7°05'	0.5	9°38'~10°29'	0.9
3°41'~4°32'	0.2	7°05'~7°56'	0.6	>10°29'	1.0
4°32'~5°23'	0.3	7°56'~8°47'	0.7		

表3 土壤渗透分级<sup>[28]</sup>

Table 3 Classification of soil permeability

渗透系数/m·d <sup>-1</sup>	渗透分级	渗透强度
>1.00	A	极强
0.40~1.00	B	强
0.05~0.40	C	中等
<0.05	D	弱

### 1.3.2 专家打分法

专家打分法是通过征询有关知名专家, 对众多专家意见进行统计、筛选、归类、处理、分析和归纳, 并客观综合专家的评分对指标进行权重赋值<sup>[29]</sup>. 本研究参考 PNPI 模型原始权重数值(LCI = 0.48, ROI = 0.26, DI = 0.26)<sup>[23,24,30]</sup> 评估流域非点源污染风险.

### 1.3.3 均方差决策法

均方差决策法根据随机变量的离散程度为随机变量的权重赋值, 值越大, 变量越离散, 权重越大, 其计算步骤如下<sup>[4]</sup>:

标准化处理:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

计算随机变量的平均值  $E(G_i)$ :

$$E(G_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (3)$$

计算  $G_i$  的均方差  $\sigma(G_j)$ :

$$\sigma(G_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_{ij} - E(G_j)]^2}{n}} \quad (4)$$

计算  $G_j$  的权重系数  $W(G_j)$ :

$$W(G_j) = \sigma(G_j) / \sum_{j=1}^n \sigma(G_j) \quad (5)$$

式中,  $x_{ij}$  为指标集  $G_j$  中的指标值,  $z_{ij}$  为标准化后的指标值,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为  $G_j$  指标集中的最大值和最小值,  $E(G_i)$  为第  $j$  项评价指标的平均值,  $\sigma(G_j)$  为第  $j$  项评价指标的均方差,  $W(G_j)$  为第  $j$  项评价指标的权重.

### 1.3.4 熵值法

熵值法根据信息熵度量一个随机变量的信息量, 信息量越多, 熵值越小, 指标权重越大; 反之亦然<sup>[31]</sup>. 其计算步骤如下.

假设有  $m$  样本  $n$  评价指标, 构建初始数据矩阵  $X$ :

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (6)$$

并用公式(2)进行数据标准化处理, 得到标准化矩阵  $Y$ :

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

计算评价指标的熵值  $H_i$ :

$$H_i = -k \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$f_{ij} = y_{ij} / \left( \sum_{j=1}^m y_{ij} \right), \quad (k = 1/\ln m) \quad (9)$$

计算评价指标的权重  $W_i$ :

$$W_i = (1 - H_i) / \left( m - \sum_{i=1}^n H_i \right) \quad (10)$$

式中,  $x_{ij}$  为  $i$  个样本  $j$  项指标的原始值;  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为矩阵  $X$  中的最大值和最小值;  $f_{ij}$  为  $i$  个样本  $j$  项指标的比重.

### 1.3.5 变异系数法

变异系数法是通过随机变量的差异大小和对比强度确定变量的权重, 差异越大, 指标对评价对象的贡献越大, 权重越大<sup>[32]</sup>. 其计算步骤如下:

计算指标变异系数  $CV_i$ :

$$CV_i = \sigma_i / \bar{X}_i \quad (11)$$

计算各指标权重  $W_i$ :

$$W_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^m CV_i} \quad (12)$$

式中,  $\bar{X}_i$  为第  $i$  个指标均值;  $\sigma_i$  为第  $i$  个指标的 standard deviation.

### 1.3.6 指数函数法

参考 Sartor 等<sup>[15]</sup> 和 Yang 等<sup>[16]</sup> 的研究成果, 将土地利用指标归为污染源因子, 径流指标和距离指标归为污染运输因子, 描述污染源因子与运输因子之间的关系, 构建土地利用指标、径流指标和距离

指标的指数函数关系. 其计算步骤为: ①用公式(2)对 3 个指标进行标准化处理, ②建立土地利用指标、径流指标和距离指标之间的指数函数关系:

$$PNPI = LCI \times [\exp(ROI) + \exp(DI)] \quad (13)$$

### 1.3.7 Jenks 自然间断点分级法

Jenks 自然间断点分级法又称自然断点法, 通过迭代算法计算数据序列的断点, 使各等级间差异最大化, 每个等级内差异最小化, 从而对数据中的相似值进行分组, 该方法保持了数据的统计性<sup>[33]</sup>.

### 1.3.8 变化斜率法

为研究流域潜在非点源污染风险的时间序列变化趋势, 本文采用变化斜率法对 1980 ~ 2020 年北运河上游流域潜在非点源污染风险的年际变化进行定量分析, 计算公式如下<sup>[34]</sup>:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times A_i - \left( \sum_{i=1}^n i \right) \left( \sum_{i=1}^n A_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (14)$$

式中, slope 为变化斜率;  $n$  为时间年数;  $A_i$  为第  $i$  年的非点源污染风险 (LCI/ROI/PNPI); 当 slope < 0, 表明北运河上游流域潜在非点源污染风险呈降低的趋势, 反之亦然.

## 2 结果与分析

### 2.1 潜在非点源污染风险指标时空变化特征

#### 2.1.1 土地利用指标时空变化特征

北运河上游流域的土地利用指标总体呈现东南高西北低的空间分布特征 (图 3). 东南区域地势平坦, 主要为旱地、城镇用地和农村居民点, 人口密集, 人类活动频繁, 农药化肥施用、村镇地表径流和生活污水排放等极易对流域产生污染, 例如: 西北旺镇、回龙观镇、沙河镇、百善镇、昌平镇、马池口镇和城南城北街道等区域. 西北山区土地利用类型主要为有林地、疏林地和灌木林地等土地利用类型, 该区地势陡峭, 受人类活动干扰较少, 因此产生污染的风险较低. 1980 ~ 2020 年, 西北山区土地利用指标几乎不变, 而东南地区大部分区域变化相对剧烈. 阳坊镇、苏家坨镇、上庄镇、流村镇西部受退耕还林<sup>[35]</sup> 和生态移民<sup>[36]</sup> 等政策的影响, 大部分区域土地利用类型由旱地转为疏林地或有林地, 土地利用指标值有降低的趋势; 而流村镇、南口镇、昌平镇、沙河镇、百善镇、史各庄、回龙观镇和永丰乡受城镇化<sup>[37]</sup> 的影响, 地类由旱地转为城镇用地, 土地利用指标值有持续增加的趋势.

#### 2.1.2 径流指标时空变化特征

流域径流指标整体呈西北高东南低的空间特征

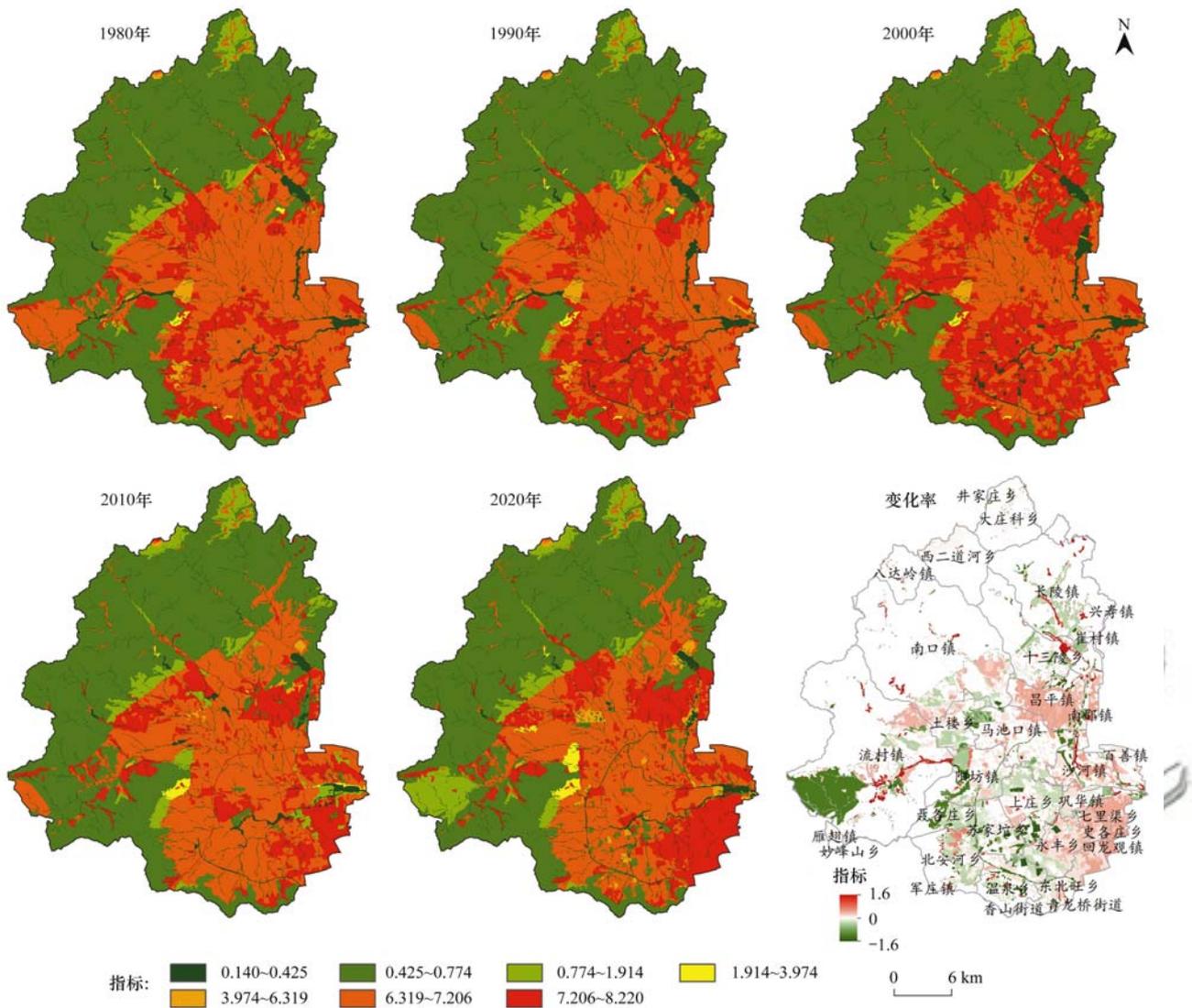


图3 1980~2020年北运河上游流域土地利用指标时空变化特征

Fig. 3 Spatial-temporal variation characteristics of LCI in the upper Beiyun River basin from 1980 to 2020

(图4). 径流指标值主要受土壤类型、土地利用和坡度等因素的影响. 研究区土壤类型以褐土、潮土和棕壤为主, 土壤渗透等级属于中等和弱两个强度, 因此该区径流指标值受土壤类型的影响较小. 主城区不透水面积比例高, 径流系数在 0.77~0.92 之间, 污染物迁移过程中损失较少, 污染风险较高, 而有林地、疏林地和灌木林地的径流系数在 0.36~0.84 之间. 研究区坡度差异较大, 西北山区地势陡峭, 坡度较大, 污染物在迁移过程中向下渗透少, 坡度对径流系数的修正系数较高, 导致径流指标值较高; 而东南平原区坡度较小, 坡度对径流系数的修正系数较低, 坡度与径流指标有较强的相关性. 1980~2020年, 径流指标西北山区变化小, 而东南平原区受土地利用类型变化的影响, 变化较大. 流村镇、南口镇和昌平镇等主城区在城市扩张影响下, 下垫面不透水面积占地和径流系数逐渐增加, 因此, 径流指标呈增加的趋势; 而苏家坨镇、上庄镇和流村镇

西部区域, 地类由旱地变为有林地和疏林地, 径流系数降低, 导致径流指标呈降低的趋势.

### 2.1.3 距离指标空间分布特征

如图5所示, 距离接纳水体越近, 非点源污染物在迁移过程中损失越小, 非点源污染风险越高; 距离接纳水体越远, 非点源污染物在迁移过程中损失越多, 非点源污染风险越低.

## 2.2 不同赋权方法潜在非点源污染风险空间分布特征对比分析

不同赋权方法得出流域非点源污染风险空间分布特征如图6. 整体上, 北运河上游非点源污染风险呈西北低东南高的空间分布特征, 极高风险区主要分布在接纳水体两侧. 主要原因是: ①西北山区土地利用类型主要为林地、草地, 且远离接纳水体和居民地, 产生污染风险较少, 潜在非点源污染风险极低; ②东南平原区域地势平坦, 土地类型主要为水田、旱地、城镇用地、农村居民点等地类, 土地利

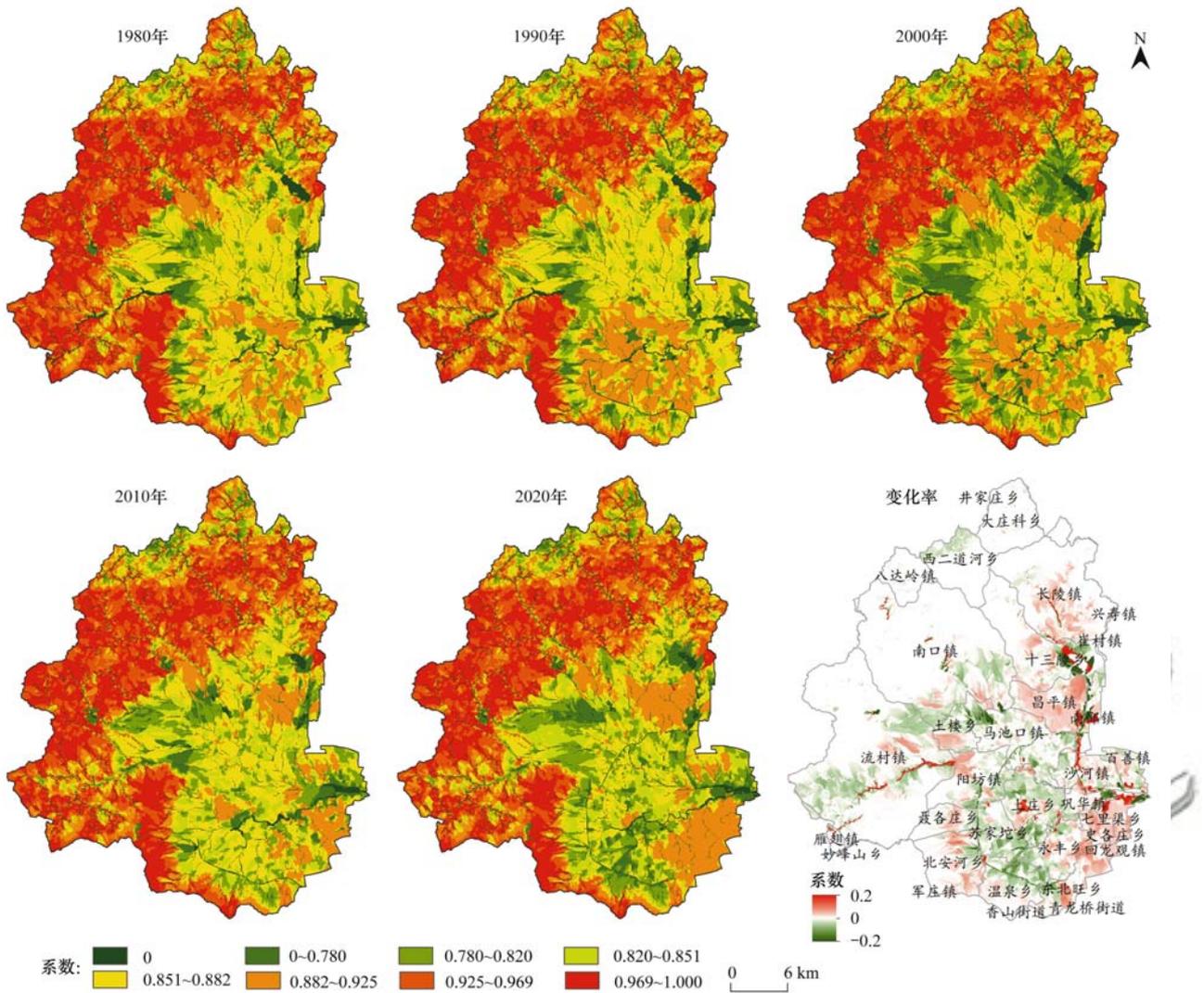


图 4 1980 ~ 2020 年北运河上游流域径流指标时空变化特征

Fig. 4 Spatial-temporal variation characteristics of ROI in the upper Beiyun River basin from 1980 to 2020

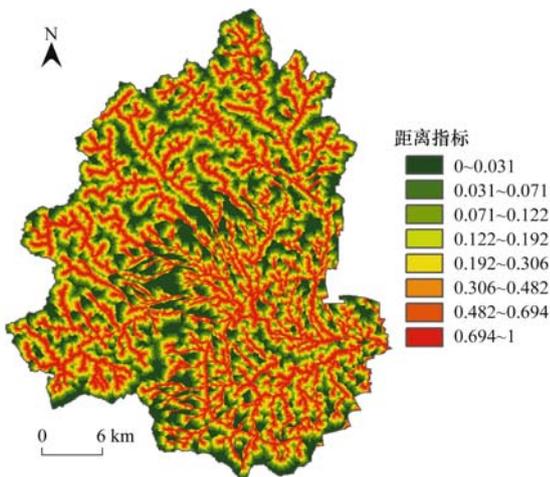


图 5 距离指标空间特征

Fig. 5 Spatial characteristics of DI

用指标极高;同时靠近河网,污染物对受纳水体的污染风险较高,距离指标较高;③东南平原,地类受人类干扰,养殖业和种植业发达,化肥农药和畜禽粪

便增加污染风险. 变异系数和均方差决策法得出西部山区主要为极低风险区,但还伴随着低和中等风险区,而熵值法和专家打分得出该区主要为低风险区,伴随着中等风险区;而指数函数得出该区基本全部为极低风险区. 变异系数和均方差决策法得出东南平原区中等风险区主要分布远离受纳水体和居住地的区域,高风险区主要分布在城镇用地和农村居民点上,极高风险区主要分布在受纳水体附近;指数函数得出该区主要为中等风险区,而熵值法和专家打分法主要为高风险区和极高风险区.

不同赋权方法得出各风险等级面积占比差异较大(表 4). 流域潜在非点源污染风险极低、低、中等、高和极高区的 1980 ~ 2020 年平均面积占比分别为: ① 30.04%、14.02%、26.98%、17.38% 和 11.58% (变异系数法); ② 31.36%、18.24%、17.85%、20.38% 和 12.17% (均方差决策法); ③ 3.72%、35.32%、15.95%、21.10% 和 23.92%

(熵值法)；④ 54.22%、1.05%、19.51%、19.00% 和 6.23% (指数函数法)；⑤ 0.54%、38.04%、16.38%、26.63% 和 18.40% (专家打分法)。其中，指数函数法得出非点源污染风险极低风险区面积占

比最高为 54.22%，而低风险和极高风险面积占比最低，分别为 1.05% 和 6.23%；专家打分法得出非点源污染风险极低风险面积占比最小 6.17%，而低风险和高风险最高分别为 38.04% 和 26.63%。

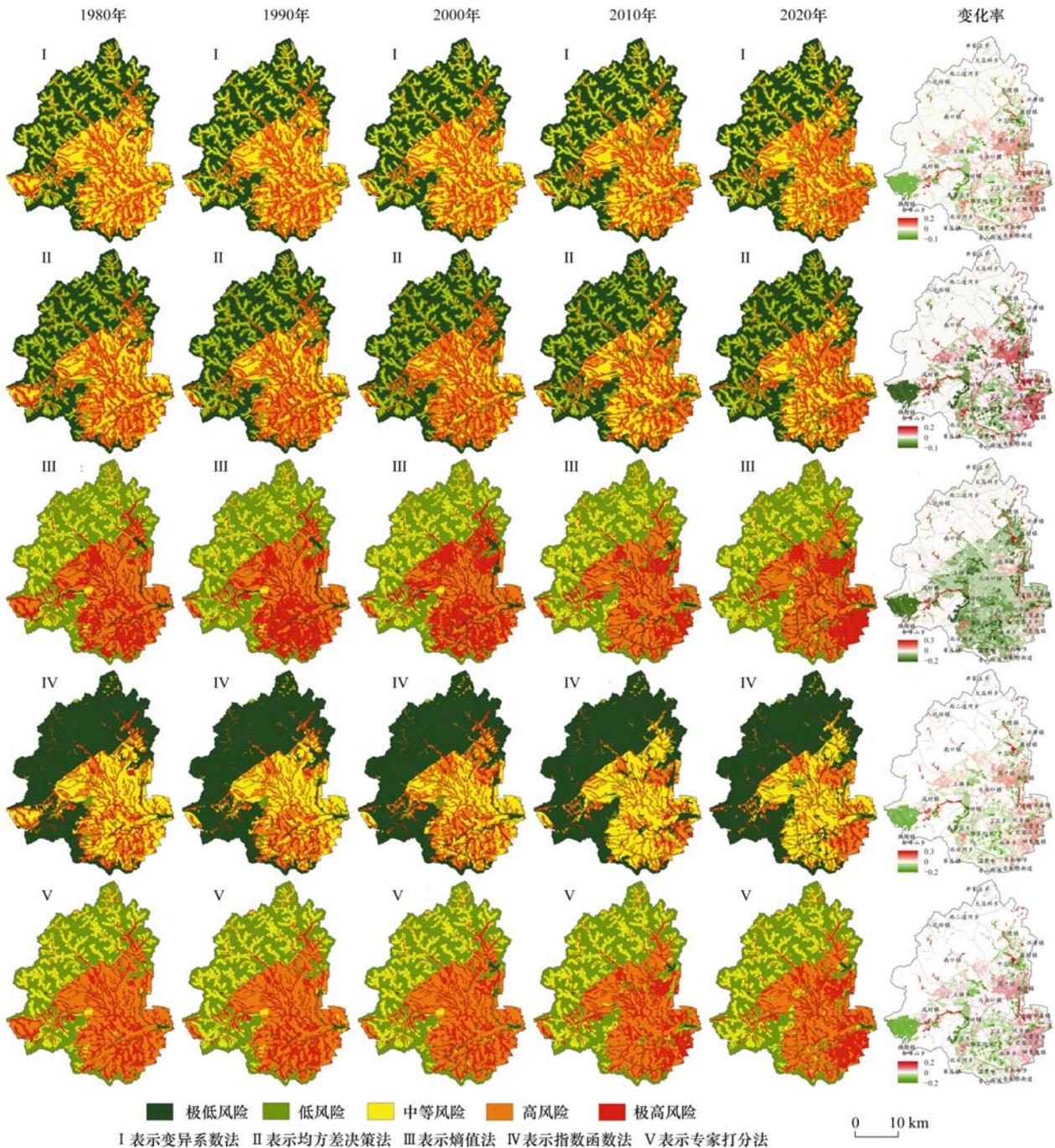


图 6 1980 ~ 2020 年基于不同赋权方法潜在非点源污染风险空间变化特征

Fig. 6 Temporal change characteristics of potential non-point source pollution risks based on different weighting methods from 1980 to 2020

### 2.3 不同赋权方法潜在非点源污染风险时间变化特征对比分析

#### 2.3.1 指标权重时间变化特征分析

不同的赋权方法得到的土地利用、径流和距离这 3 个指标的权重如表 5。均方差决策法、熵值法、变异系数法和专家打分法均得出土地利用指

标权重最大，平均权重分别为 0.46、0.53、0.45 和 0.48，这表明可以通过调整土地利用结构降低流域潜在非点源污染风险<sup>[4]</sup>。但不同赋权方法得到的径流和距离权重差异较大，均方差决策法和变异系数法得出的径流指标权重在这 3 个指标中最小，平均权重分别为 0.21 和 0.10，而熵值法却

得出距离指标平均权重最小为 0.15。1980~2020 年,均方差决策法和变异系数法土地利用指标权重有增加的趋势,而熵值法土地利用指标权重有降低的趋势。受退耕还林、城镇化和生态移民等政

策的影响,土地利用结构发生改变,土地利用斑块破碎度增加,导致土地利用指标的离散性和差异性增加,不同赋权方法得出的土地利用指标权重变化趋势不同。

表 4 1980~2020 年基于不同赋权方法潜在非点源污染风险等级和平均面积占比

Table 4 Risk levels of potential non-point source pollution and the proportion of average area based on different weighting methods from 1980 to 2020

非点源污染 风险等级	专家打分法		指数函数法		熵值法		均方差决策法		变异系数法	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%								
极低	6.17	0.54	615.25	54.22	42.16	3.72	355.88	31.36	340.88	30.04
低	431.65	38.04	11.89	1.05	400.83	35.32	207.03	18.24	159.04	14.02
中等	185.91	16.38	221.40	19.51	180.97	15.95	202.54	17.85	306.11	26.98
高	302.19	26.63	215.55	19.00	239.38	21.10	231.23	20.38	197.26	17.38
极高	208.84	18.40	70.66	6.23	271.41	23.92	138.08	12.17	131.46	11.58

表 5 1980~2020 年土地利用指标、径流指标和距离指标权重

Table 5 Weightings of the land use, runoff, and distance indicators from 1980 to 2020

年份	均方差决策法			熵值法			变异系数法			专家打分法		
	LCI	ROI	DI									
1980	0.4571	0.2078	0.3351	0.5594	0.2943	0.1463	0.4426	0.1020	0.4554	0.4800	0.2600	0.2600
1990	0.4575	0.2109	0.3316	0.5678	0.2837	0.1485	0.4522	0.1032	0.4445	0.4800	0.2600	0.2600
2000	0.4626	0.2132	0.3242	0.5744	0.2943	0.1313	0.4524	0.1068	0.4408	0.4800	0.2600	0.2600
2010	0.4649	0.2007	0.3344	0.4689	0.3639	0.1672	0.4617	0.0949	0.4434	0.4800	0.2600	0.2600
2020	0.4661	0.2024	0.3316	0.4611	0.3723	0.1667	0.4633	0.0970	0.4398	0.4800	0.2600	0.2600
平均值	0.4616	0.2070	0.3314	0.5263	0.3217	0.1520	0.4545	0.1008	0.4448	0.4800	0.2600	0.2600

### 2.3.2 潜在非点源污染风险时间变化特征分析

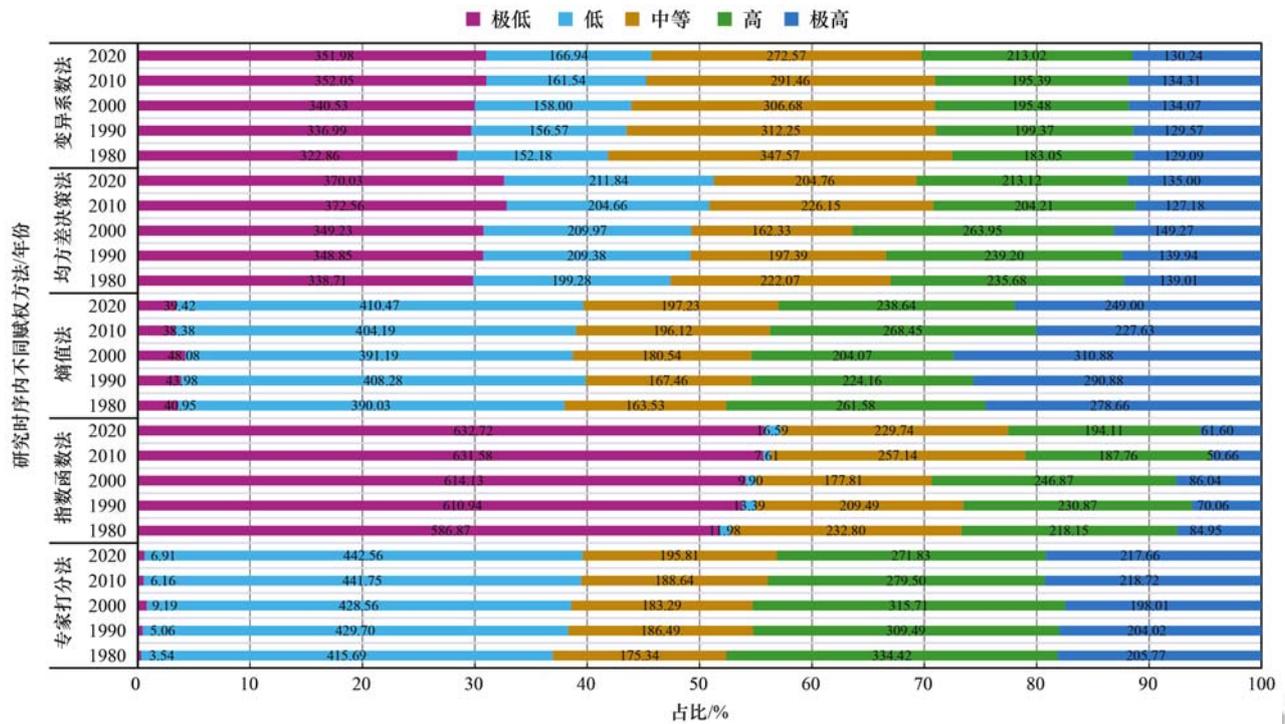
不同的赋权方法得出北运河上游非点源污染风险的时间变化特征如图 7。除熵值法外,其它 4 种方法得到的非点源污染风险时间变化率的空间分布基本一致。西北山区流域非点源污染风险基本不变,仅受纳水体附近的非点源污染风险有增加的趋势。东南地区流域非点源污染风险时间变化剧烈,苏家坨镇、上庄镇、流村镇西部和阳坊镇受退耕还林<sup>[35]</sup>和生态移民<sup>[36]</sup>等政策的影响,部分区域土地利用类型由旱地转为疏林地和有林地,或由水田转为旱地,导致非点源污染风险降低。而流域非点源污染风险增加的区域主要为城镇用地,农村居民点等地类。例如:南口镇、昌平镇、南邵镇、马池口镇、沙河镇、百善镇、巩华镇、七里渠乡、史各庄、回龙观镇和永丰乡、东北旺乡等城区快速向外扩张,地类由旱地转为城镇用地,土地利用指标和径流指标增加,导致流域非点源污染风险增加。熵值法得出昌平镇、七里渠乡、史各庄和回龙观镇等城区非点源污染风险呈增加的趋势,而东南平原区大部分地区却呈减少的趋势,与其他赋权方法得出的趋势不同。主要是因为熵值法求出径流指标权重较大,但径流指标值较小;同时径流指标权重呈增加的趋势,权重越来越大;而且熵值法求出土地利用指标呈减少的趋势,导致该区非点源污染风险值逐渐降低。

1980~2020 年,不同赋权方法所得的潜在非点

源污染风险各等级面积变化趋势不一致(图 7)。变异系数法得出中等风险区面积比例呈减少趋势,减少了 6.61%,其它 4 个风险等级区面积比例均呈增加趋势;专家打分法得出高风险区面积比例呈减少的趋势,减少了 5.52%,其它 4 个风险等级区面积比例均呈增加的趋势。均方差决策法、指数函数法得出极低风险区和低风险区面积比例均呈增加的趋势,分别增加了 2.76%、4.04% 和 1.11%、0.41%,而熵值法得出极低风险呈降低的趋势。均方差决策法、熵值法和指数函数法得出高风险区和极高风险区均呈降低的趋势。整体上,极低和低风险区呈增加的趋势,而高和极高风险区呈减少的趋势。

### 2.3.3 极高和高风险区土地结构分析

不同赋权方法得出的极高风险区和高风险区内各土地类型面积占比差异较大(图 8)。极高风险区的主要地类为城镇用地、旱地、农村居民点、果园、水田和其它建设用地。极高风险区中水田、旱地和果园的面积占比在 1980~2020 年间分别减少:① 18.50%、17.66% 和 10.79% (专家打分方法);② 26.23%、18.92% 和 14.98% (指数函数法);③ 22.11%、10.53% 和 16.10% (熵值法);④ 16.47%、17.55% 和 9.74% (均方差决策法);⑤ 14.82%、17.96% 和 8.71% (变异系数法)。而城镇用地、农村居民点和其它建设用地极高风险区中面积占比分别增加:① 36.02%、9.66% 和 1.30%



图中数字为各风险等级的面积,单位为 km<sup>2</sup>

图 7 1980~2020 年基于不同赋权方法潜在非点源污染风险时间变化特征

Fig. 7 Temporal change characteristics of potential non-point source pollution risks based on different weighting methods from 1980 to 2020

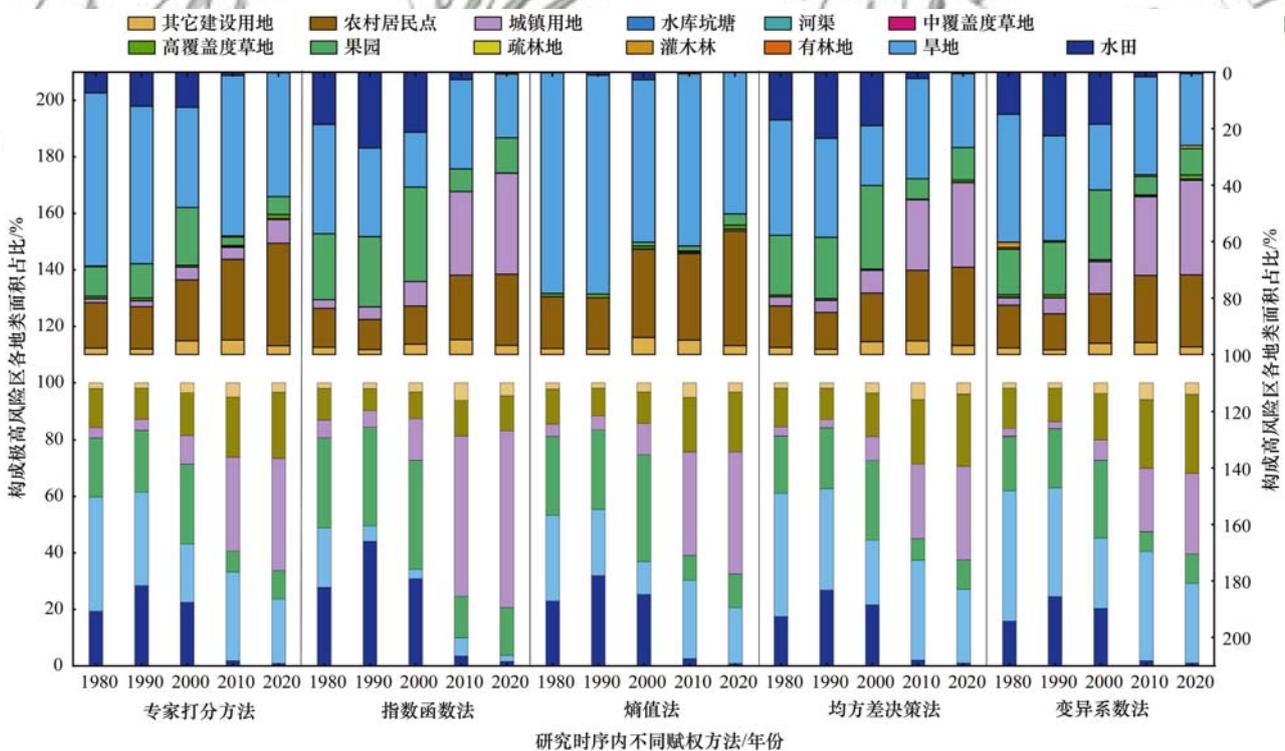


图 8 1980~2020 年基于不同赋权方法潜在非点源污染极高和高风险区土地类型

Fig. 8 Land types in areas with extremely high and high risk of potential non-point source pollution based on different weighting methods from 1980 to 2020

(专家打分方法); ② 56.30%、1.46% 和 2.37% (指数函数法); ③ 38.92%、8.77% 和 1.06% (熵值法); ④ 29.88%、11.88% 和 2.07% (均方差决策法); ⑤ 25.81%、13.74% 和 2.20% (变异系数法)。

高风险区的主要土地利用类型为水田、旱地、果园、城镇用地、农村居民点、其它建设用地和草地(高、中覆盖度草地),其中旱地面积占比最大.从图 8 可见,高风险区中水田、旱地和果园的面积比例

呈降低的趋势,而城镇用地、农村居民点和其它建设用地面积比例呈增加的趋势.研究时序内北运河上游流域潜在非点源污染极高和高风险区主要地类由水田、旱地和果园逐渐演变为城镇用地和农村居民地.

### 3 讨论

PNPI 模型通过土地利用、径流和距离这 3 个指标综合反映非点源污染发生的风险,其优点是输入数据的广泛可用性,无需详细的基础数据和实测的水文数据;且操作简单,能有效地解析出符合流域实际的潜在非点源污染风险分布特征<sup>[4]</sup>.但 PNPI 模型不能详细模拟和评估每一种污染物的迁移过程和污染物负荷;同时该模型是靠专家的经验来对土地利用指标赋值,具有一定的主观性<sup>[26]</sup>;而且不同地区的气候、土地利用管理、土地利用强度和耕作方式不同,会使 PNPI 模型的土地利用参数无法通用<sup>[30]</sup>.因此,未来可采用实测水质数据,构建不同污染物和土地利用指标之间的定量关系,校核 PNPI 模型参数,以实现 PNPI 模型对特定污染物负荷的定量模拟和污染物关键源解析,提升 PNPI 模型的适用性.

本研究表明赋权方法对流域非点源污染风险分析结果影响较大,不同赋权方法得出流域潜在非点源污染风险时空变化特征不同.不同赋权方法得出的流域潜在非点源污染风险可以分为 3 类(图 6 和图 7),I 类是以专家打分法和熵值法得出的流域非点源污染风险“严格”型,这类非点源污染极高和高风险区面积占比较大,而极低风险区面积占比较小;II 类是以均方差决策法和变异系数法得出的流域非点源污染风险“中等”型,这类非点源污染 5 个风险等级面积占比相对平均;III 类是以指数函数法得出的流域非点源污染风险“宽松”型,这类非点源污染

极低风险区面积占比较大,而极高风险面积占比较小.北运河上游是北运河重要的水源涵养区,对改善流域生态环境和水生态修复至关重要;同时,“山水林田湖草是生命共同体”对流域水污染治理提出了严格要求.在 I 类“严格”型中,东南地区非点源污染风险几乎全部为极高和高风险区,非点源污染关键源区面积太大,而且还包含有林地和疏林地等非点源污染风险较低的土地利用类型,与实际不符;在 II 类“中等”型中,非点源污染极高和高风险区主要分布在东南地区的城镇用地和旱地上,得出的非点源污染极高和高风险区时空分布特征与指数函数法得出的结果相似.因此,北运河上游非点源污染风险评估应推荐均方差决策法和变异系数法对土地利用、径流和距离这 3 个指标进行赋权.结果为流域非点源污染重点(高风险)区优先治理提供空间依据,从而尽可能降低北运河上游非点源污染风险,保障流域水生态安全.而根据流域的实际情况,本研究得出指数函数法输出的结果更符合北运河上游流域非点源污染风险空间分布特征.首先,西北山区主要土地利用类型为有林地、灌木林和疏林地,植被覆盖度较高,水土流失量较小;同时该区坡度陡峭,受人类活动影响较小,且远离下游接纳水体,应属于极低风险区.熵值法和专家打分法判断该区域主要为低风险和中等风险区;变异系数法和均方差决策法判断该区域主要为极低风险区,但还伴随着大面积的低和中等风险区;而指数函数法得出该区基本全部为极低风险区,与实际情况一致.其次,由表 6 可见,指数函数法得出的极低风险区面积占比与研究区林地(林地、灌木林和疏林地)的面积占比最为接近.此外,指数函数法避免了指标权重确定带来的主观误差<sup>[16]</sup>和数据质量带来的系统误差,清晰地描述了污染源因子与运输因子之间的指数函数关系<sup>[38]</sup>.

表 6 1980~2020 年林地与不同赋权方法极低风险区面积占比/%

Table 6 Area proportion of woodland and extremely low-risk areas with different weighting methods from 1980 to 2020/%

类型/方法	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
林地(有林地、灌木林和疏林地)	49.21	51.37	50.42	53.12	53.81
指数函数法	51.72	53.84	54.12	55.66	55.76
均方差决策法	29.85	30.74	30.78	32.83	32.61
变异系数法	28.45	29.70	30.01	31.02	31.02
熵值法	3.61	3.88	4.24	3.38	3.47
专家打分法	0.31	0.45	0.81	0.54	0.61

流域非点源污染防治应根据非点源污染风险的空间分布特征合理布局防控措施体系.例如:极高风险区的城乡居民点应优先治理,可采用生物滞留池<sup>[39]</sup>、透水铺装<sup>[40]</sup>、植被过滤带<sup>[41]</sup>和人工湿地<sup>[42]</sup>等措施降低地表径流污染风险;对于高风险的旱地

和果园等污染区域,可通过调整种植结构,改变传统种植模式,推行测土配方、定量施肥施药以降低农药和化肥等污染风险;对于畜禽养殖污染风险可推行畜禽生态养殖模式<sup>[43]</sup>,采用畜禽粪便无害化处理<sup>[44]</sup>等措施;而对于西北低风险区可采取封育措

施进行生态保护. 本研究表明, 合理优化土地利用结构和空间布局能降低区域非点源污染风险. 但土地利用变化复杂, 且存在空间异质性, 无法通过改变某种地类的面积去评价流域非点源污染风险的变化情况. 例如: 本研究中水田、旱地和果园等高风险地类在减少, 但城镇用地和农村居民点等高风险地类却在增加, 无法判断流域非点源污染高风险区面积是降低还是增加. 因此, 如何优化土地利用结构和空间布局; 城镇用地、农村居民点和旱地等地类的面积变化及其向非点源污染高风险区的转化情况等问题有待进一步研究.

#### 4 结论

(1) 北运河上游非点源污染风险呈东南部高西北部低空间特征. 极高风险区主要分布在人口密集的东南平原区河道两侧, 主要土地利用类型为水田、旱地、果园、城镇用地、农村居民点和其它建设用地, 极低风险区主要分布在远离受纳水体的西北山区. 1980~2020年, 北运河上游非点源污染极高和高风险区面积呈减少的趋势, 而极低和低风险区却呈增加的趋势; 同时极高和高风险区主要地类由旱地、水田和果园逐渐变为城镇用地和农村居民地.

(2) 均方差决策法、熵值法、变异系数法和专家打分法均得出土地利用指标权重最大, 平均权重分别为 0.46、0.53、0.45 和 0.48, 而不同赋权方法确定的径流指标和距离指标的权重差异较大, 得出的各非点源污染风险等级区的面积占比差异也较大.

(3) 指数函数法通过建立土地利用指标与径流和距离两个指标之间的指数函数关系, 输出结果更符合流域非点源污染风险空间分布特征, 得出极低风险区面积占比最高为 54.22%, 而低风险和极高风险面积占比最低分别为 1.05% 和 6.23%.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Lian Q Y, Yao L G, Ahmad Z U, *et al.* Nonpoint source pollution[J]. *Water Environment Research*, 2019, **91**(10): 1114-1128.
- [ 2 ] 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 等. 三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1276-1285.  
Chen S Q, Long Y, Yan D C, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in the shipanqiu watershed, Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1276-1285.
- [ 3 ] 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 等. 基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4555-4563.  
Feng A P, Wang X L, Xu Y, *et al.* Assessment of potential risk of diffuse pollution in Haihe River Basin based using DPeRS model[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4555-4563.
- [ 4 ] 时迪迪, 张守红, 王红. 北沙河上游流域潜在非点源污染风险时空变化分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(4): 921-931.  
Shi D D, Zhang S H, Wang H. Risk analysis of spatio-temporal variation of potential non-point source pollution in the upper reaches of the Beisha River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(4): 921-931.
- [ 5 ] Yasarer L M W, Lohani S, Bingner R L, *et al.* Assessment of the soil vulnerability index and comparison with AnnAGNPS in two Lower Mississippi River Basin watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **75**(1): 53-61.
- [ 6 ] Liu R M, Xu F, Zhang P P, *et al.* Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, **533**: 379-388.
- [ 7 ] 刘芳, 赵进勇, 路明, 等. 基于 SWMM 的城市初雨净化设施布局优化研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, **18**(3): 212-222.  
Liu F, Zhao J Y, Lu M, *et al.* Research on layout optimization of urban initial rain purification facilities based on SWMM[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2020, **18**(3): 212-222.
- [ 8 ] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, *et al.* An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **84**: 104-111.
- [ 9 ] 王清睿, 刘瑞民, 门聪, 等. 基于 CLUE-S 的香溪河土地利用变化预测与总磷污染负荷分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(4): 747-755.  
Wang Q R, Liu R M, Men C, *et al.* Land use change predictions based on the CLUE-S model and total phosphorus load analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(4): 747-755.
- [ 10 ] Shen Z Y, Hou X S, Li W, *et al.* Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **123**: 96-107.
- [ 11 ] 欧阳威, 刘迎春, 冷思文, 等. 近三十年非点源污染研究发展趋势分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(10): 2234-2241.  
Ouyang W, Liu Y C, Leng S W, *et al.* An analysis of research trends about non-point source pollution over the last three decades[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(10): 2234-2241.
- [ 12 ] 闫雪嫒, 卢文喜, 欧阳琦. 基于替代模型的非点源污染模拟不确定性分析——以石头口门水库汇水流域为例[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 3011-3018.  
Yan X M, Lu W X, Ouyang Q. Uncertainty analysis of non-point source pollution simulation based on surrogate model—case study for Shitoukoumen Reservoir Catchment Basin[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3011-3018.
- [ 13 ] Yan X M, Lu W X, An Y K, *et al.* Assessment of parameter uncertainty for non-point source pollution mechanism modeling: a Bayesian-based approach[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114570.
- [ 14 ] Zhai X Y, Zhang Y Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China[J]. *Hydrological Processes*, 2014, **28**(4): 1627-1640.
- [ 15 ] Sartor J D, Boyd G B, Agardy F J. Water pollution aspects of street surface contaminants[J]. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1974, **46**(3): 458-467.
- [ 16 ] Yang F, Xu Z C, Zhu Y Q, *et al.* Evaluation of agricultural

- nonpoint source pollution potential risk over China with a Transformed-Agricultural Nonpoint Pollution Potential Index method[J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(21-24): 2951-2963.
- [17] Li Z G, Zhang R H, Liu C, *et al.* Phosphorus spatial distribution and pollution risk assessment in agricultural soil around the Danjiangkou reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134417.
- [18] Wu B, Zhang X, Xu J, *et al.* Assessment and management of nonpoint source pollution based on multicriteria analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(26): 27073-27086.
- [19] 荆延德, 张华美. 基于LUCC的南四湖流域面源污染输出风险评估[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(1): 128-139.  
Jing Y D, Zhang H M. Risk assessment of non-point source pollution output in Nansihu Lake basin based on LUCC[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(1): 128-139.
- [20] 许芬, 周小成, 孟庆岩, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, **40**(8): 2609-2620.  
Xu F, Zhou X C, Meng Q Y, *et al.* Remote sensing identification and evaluation of non-point source pollution risk of drinking water source based on “source-sink” landscape[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(8): 2609-2620.
- [21] 贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 基于“源-汇”理论的资江下游地区非点源污染风险区划[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(10): 3518-3528.  
Jia Y X, Shuai H, Han L F. Zonation on non-point source pollution risk in the lower reaches of Zijiang River based on the “source-sink” theory[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(10): 3518-3528.
- [22] 雷能忠, 黄大鹏. 基于GIS的农业面源污染风险评估[J]. *中国农学通报*, 2007, **23**(12): 381-385.  
Lei N Z, Huang D P. Research on risk assessment of agricultural non-point source pollution with GIS[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, **23**(12): 381-385.
- [23] Munafò M, Cecchi G, Baiocco F, *et al.* River pollution from non-point sources: a new simplified method of assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **77**(2): 93-98.
- [24] Cecchi G, Munafò M, Baiocco F, *et al.* Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index[J]. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita*, 2007, **43**(3): 295-301.
- [25] 李婷, 武晓峰. 基于PPI的河段水体潜在污染研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2619-2626.  
Li T, Wu X F. Study on the potential pollution in river section based on PPI[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2619-2626.
- [26] 聂启阳, 吕继强, 孙夏利, 等. 土地利用变化影响的淄河流域潜在非点源污染风险时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, **30**(5): 80-88.  
Nie Q Y, Lü J Q, Sun X L, *et al.* Spatial and temporal variations of non-point source pollution risk affected by land use changes in Bahe River Basin[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019, **30**(5): 80-88.
- [27] Liu J, Shen Z Y, Chen L. Assessing how spatial variations of land use pattern affect water quality across a typical urbanized watershed in Beijing, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, **176**: 51-63.
- [28] 车振海. 试论土壤渗透系数的经验公式和曲线图[J]. *东北水利水电*, 1995, (9): 17-19.
- [29] 杨丰政. 基于GIS的徐水县气象灾害风险评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.  
Yang F Z. Zoning of risk assessment of meteorological disaster based on GIS in Xushui county[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [30] 李婷. 基于PPI的流域污染负荷分布评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
Li T. Study on assessment of pollution load in small watershed based on PPI[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [31] 耿润哲, 王萌, 何洪宇, 等. 生态环境行业扶贫绩效量化评估方法初探: 以承德市围场满族蒙古族自治县为例[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(2): 501-510.  
Geng R Z, Wang M, He H Y, *et al.* Quantitative evaluation and analysis the performance of ecological and environment poverty alleviation: an example study in Weichang county, Chengde City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(2): 501-510.
- [32] 王立盟, 孟浩. 基于熵值和变异系数组合赋权法的生态文明评价体系构建及实证分析[J]. *高技术通讯*, 2018, **28**(4): 372-381.  
Wang L M, Meng H. Design and empirical research on the ecological civilization construction evaluation system based on entropy method and coefficient of variation[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2018, **28**(4): 372-381.
- [33] 赖冠中, 陈文音. 基于自然断点法分析的城乡建设用地整理潜力分区研究——以汕头市濠江区为例[J]. *广西城镇建设*, 2019, (12): 123-127.
- [34] 夏会娟, 孔维静, 孙建新, 等. 基于MODIS NDVI的辽河保护区成立前后植被覆盖时空动态研究[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5434-5442.  
Xia H J, Kong W J, Sun J X, *et al.* Spatial-temporal dynamics of vegetation cover before and after establishment of Liaohe River Reserve based on MODIS NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(15): 5434-5442.
- [35] 逯进生. 北京市退耕还林成效分析及成果巩固策略[J]. *林业资源管理*, 2009, (5): 44-49.  
Lu J S. Analysis and consolidation strategies of the results of the “Returning Farmland to Forest” project in Beijing[J]. *Forest Resources Management*, 2009, (5): 44-49.
- [36] 王江. 密云水库上下游流域生态补偿政策设计初探[J]. *中国农村水利水电*, 2014, (9): 68-69.
- [37] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(8): 976-986.  
Han H R, Yang C F, Song J P. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios[J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(8): 976-986.
- [38] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(3): 375-383.  
Hao F H, Yang S T, Cheng H G, *et al.* A method for estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(3): 375-383.
- [39] Zhang S H, Guo Y P. SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, **20**(8), doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001092.
- [40] 李美玉, 张守红, 王云琦, 等. 不同清理方式对北京市透水砖铺装渗透率衰减过程影响[J]. *北京林业大学学报*, 2020, **42**(3): 143-150.  
Li M Y, Zhang S H, Wang Y Q, *et al.* Clogging processes of

- permeable paver systems under different maintenance methods in Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(3): 143-150.
- [41] 汤家喜, 何苗苗, 周博文, 等. 辽河上游河岸植被过滤带对地下渗流中氮磷截留效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(1): 39-45.
- Tang J X, He M M, Zhou B W, *et al.* Ground water nitrogen and phosphorus retention by established riparian vegetated filter strips in the Upstream of Liaohe River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(1): 39-45.
- [42] 赵林丽, 邵学新, 吴明, 等. 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4236-4241.
- Zhao L L, Shao X X, Wu M, *et al.* Effects of different substrates and particle sizes on wastewater purification[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4236-4241.
- [43] 郭珊珊, 张涵, 杨汝馨. 基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究——以四川省为例[J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(1): 226-232.
- Guo S S, Zhang H, Yang R X. Pollutant loads and environmental risks of livestock production based on arable land carrying capacity—a case study in Sichuan province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 226-232.
- [44] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. *中国工程科学*, 2018, **20**(5): 103-111.
- Wu S X, Liu H B, Huang H K, *et al.* Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, **20**(5): 103-111.



## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)