

DOI: 10.5846/stxb202103070621

赵银兵, 陈利顶, 孙然好, 倪忠云, 蒲梦馨, 周国李, 罗宇豪. 基于资源利用和灾害风险的京津冀地区环境地质敏感性区划. 生态学报, 2022, 42(6): 2251-2264.

Zhao Y B, Chen L D, Sun R H, Ni Z Y, Pu M X, Zhou G L, Luo Y H. Regionalization of environmental geological sensitivity in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on resource utilization and disaster risk. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2251-2264.

基于资源利用和灾害风险的京津冀地区环境地质敏感性区划

赵银兵^{1,3}, 陈利顶², 孙然好^{2,*}, 倪忠云⁴, 蒲梦馨⁴, 周国李¹, 罗宇豪¹

1 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹), 衡水 053000

4 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

摘要: 环境地质敏感性是区域生态功能的本底, 也是构建生态安全格局和开展生态保护与修复的重要基础。因环境地质敏感性涉及因素众多、且多源异构数据较难融合, 当前基于环境地质敏感性的大尺度区划研究较少。通过集成地质、地理和专题数据, 在土地沙化、土壤盐渍化、崩塌-滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降、地下水地质环境功能、浅层地下水质量、地下水调蓄和地下水可持续利用 11 个单项环境地质敏感性评价的基础上, 进一步将其归并为土地环境、地质灾害和地下水环境 3 个环境地质子系统并构建评价指标体系, 完成综合环境地质敏感性评价。以地质地貌分区为主要依据, 将研究区划分为 3 个一级环境地质敏感区和 16 个环境地质敏感性亚区。研究表明: 环境地质区划与地质构造及分区、地质地貌和人类活动等自然与人为因素存在较强的空间重合; 综合环境地质敏感性呈现出西北低、东南高的宏观格局; 华北平原区主要受地面沉降和地下水环境敏感性影响, 人类活动作用显著; 华北山区主要受重力型地质灾害影响, 内蒙古高原区主要受沙化和局地泥石流灾害影响, 区域尺度以自然因素驱动为主, 局部人类活动影响显著。针对综合环境地质敏感性区划结果, 需要统筹全域国土空间规划, 加强地貌过渡带及城乡关键区域的环境地质问题治理, 提升关键生态源地、廊道和节点所在区域的韧性, 全面实现城乡协同、生态协同和环境协同。

关键词: 环境地质; 地质灾害; 地貌梯度; 敏感性指数; 生态安全

Regionalization of environmental geological sensitivity in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on resource utilization and disaster risk

ZHAO Yinbing^{1,3}, CHEN Liding², SUN Ranhao^{2,*}, NI Zhongyun⁴, PU Mengxin⁴, ZHOU Guoli¹, LUO Yuhao¹

1 College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Key Laboratory of Wetland Ecology and Protection of Hebei Province (in preparation), Hengshui 053000, China

4 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Environmental geological sensitivity is not only the background of regional ecological function but also the important foundation of ecological security pattern construction and ecological protection and restoration. However, there are many factors involved in environmental geological sensitivity which makes it difficult to integrate multi-source data.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503001); 河北省湿地生态与保护重点实验室(筹)开放基金(hk1k201902)

收稿日期: 2021-03-07; **网络出版日期:** 2021-11-26

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

Therefore, few studies are focused on the comprehensive regionalization in a large scale based on environmental geological assessment. Here, eleven individual environmental geological sensitivities were evaluated by integrating geological, geographic and thematic data, including land desertification, soil salinization, landslide, debris flow, ground collapse, ground fissure, land subsidence, groundwater geological environment function, shallow groundwater quality, groundwater regulation and storage, and groundwater sustainable utilization. Then, the eleven individual environmental geological sensitivities were divided into three environmental geological subsystems of land environment, geological disasters, and groundwater environment to construct an evaluation index system to complete the comprehensive environmental geological sensitivity evaluation. Finally, the study area was divided into three first-class environmental geological sensitive areas and sixteen sub areas based on the geological and geomorphological divisions. The results show that there is a strongly spatial overlap between environmental geological regionalization and natural and human factors, such as geological structure and regionalization, geological geomorphology and human activities. The comprehensive environmental geological sensitivity shows a macro pattern of low in the northwest and high in the southeast. Because of human activities, the North China Plain is mainly affected by land subsidence and groundwater environmental sensitivity. The North China Mountainous Area is mainly affected by gravity type geological disasters, while the Inner Mongolia Plateau area is mainly affected by desertification and local debris flow disasters, both the North China Mountainous area and the Inner Mongolia Plateau area are mainly driven by natural factors, and local human activities have a significant impact. According to the results of comprehensive environmental geological sensitivity zoning, it is necessary to make overall territorial spatial planning, strengthen the governance of environmental geological problems in geomorphic transition zone and urban-rural key areas, improve the resilience of key ecological sources, corridors and nodes, and comprehensively realize urban-rural coordination, ecological coordination and environmental coordination.

Key Words: environmental geology; geological disaster; geomorphic gradient; sensitivity index; ecological security

环境地质学是应用地质科学的理论与方法研究地质环境基本特征、功能和演变规律的学科,其重要特征是将人类活动作为一种地质作用营力^[1]。环境地质学研究起源于 20 世纪 60、70 年代,是欧美等国为应对环境问题和满足人类发展需要而逐步发展起来的一门学科,国内的相关研究兴起于 20 世纪 80 年代前后的环境地质调查。环境地质学有广义和狭义两类之分^[2];广义的环境地质学属于环境科学的范畴,包括环境水文地质学、环境工程地质学、环境地球化学和生态环境地质学等^[3];狭义的环境地质学主要涵盖与人类活动密切相关的地下水、地质灾害、矿山环境地质和水土环境等研究。环境地质敏感性表征环境地质的要素、子系统和系统对自然与人为作用的响应程度,敏感性越高越容易产生环境地质问题。

在各种环境地质敏感性研究之中,相关学者对地质灾害^[4-5]、矿山环境地质问题^[6-7]和城市环境地质问题^[8-9]研究较多。京津冀地区因其受复杂地质环境和大规模人类活动的交互作用影响,环境地质研究历来受到重视,研究空间尺度涉及线路工程、矿山、城市(镇)、县域和市域及全区,研究主要聚焦山区重力型地质灾害^[10]、平原区地面沉降^[11-15]和地下水污染^[16-18]等环境地质问题,评价方法包括层次分析法、信息量法、敏感性系数法、人工神经网络模型和随机森林模型等^[19]。京津冀地区综合性环境地质研究主要应用调查监测、综合分析、模拟预测和集成编图等技术手段,重点揭示环境地质要素、子系统和系统之间的作用机制^[21-23]。其中,《京津冀地区国土资源与环境地质图集》完成了多项资源与环境调查、评价和区划,较为全面地评价和分析了京津冀地区活动断裂与地震、地质灾害和地下水污染等主要环境地质问题,并提出了国土资源开发的地学建议^[22-23]。然而,京津冀地区已有环境地质敏感性研究成果多聚焦单项环境地质要素或者环境地质子系统,空间尺度多以县域及更小尺度为主,面向资源利用和灾害风险的全域综合性环境地质敏感性评价和区划成果相对不足,难以满足京津冀地区环境地质协同治理和国土空间联动开发与保护的需求。开展京津冀地区环境地质敏感性评价和区划研究,有利于进一步认识区域尺度的环境地质格局,掌握人类活动与地质环境之

间的互馈机制,为优化环境地质安全格局和实现资源与环境可持续承载提供参考,为生态安全格局构建和生态保护与修复提供支撑。

1 研究区概况

京津冀地区跨越华北平原、华北山区和内蒙古高原三个一级地质地貌单元(图1)^[22],属温带半湿润半干旱大陆性季风气候区。全区从太古界变质岩系到第四系均有出露,中生代地层分布最广;侵入岩以中酸性岩为主,喷出岩以安山岩和流纹岩为主(图2)^[22,24]。研究区包含两个一级构造单元,在康保-围场深断裂以北,为具有活动带性质的内蒙古-大兴安岭地槽褶皱系,其变质主旋回发生在华力西期;南部属于相对稳定的中朝准地台,在中生代和新生代的构造活动较为剧烈^[25]。区内地质环境复杂,人类工程活动频繁,能源和矿产资源开发活跃,自然因素与人为因素共同作用导致的环境地质问题突出,对京津冀地区的生态安全格局构建和社会经济可持续发展造成重大影响。

2 数据来源与处理

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),由DEM生成起伏度、坡度、坡位、平面曲率、剖面曲率和地形湿度等数据^[19],应用地貌界线刻画华北平原地区的二级地貌界线的环境效应^[22]。河流数据来自国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc>),应用欧氏距离刻画其影响。降水和土壤砂粒含量数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),采用多年平均降水代表气候影响。土壤湿度和最大风速数据来自全球陆面数据同化系统(<https://disc.gsfc.nasa.gov>),土壤砂粒含量、土壤湿度和最大风速用作评价土地沙化敏感性。土地利用类型数据(2015)来源于中国科学院生态环境研究中心(<http://www.rcees.ac.cn>);植被覆盖度由归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)表征,数据来自美国地质勘探局(<https://lpdaac.usgs.gov>),由2000—2019年中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)逐月数据产品合成。人类活动采用夜间灯光数据表示,数据来自美国国家海洋和大气管理局(<https://www.noaa.gov>),由2019年月数据采用最大值法合成。矿产资源开发导致塌陷和地裂缝等地质灾害,采用矿山欧氏距离刻画其影响^[22]。

地质构造运动采用主要断裂欧氏距离和地质构造分区刻画其影响^[25],研究区地跨内蒙古-大兴安岭褶皱带和中朝准地台2个一级地质构造分区,包括5个二级地质构造分区和18个三级地质构造分区(图3)。地震是突发性及次生性环境地质问题的重要控制因素,应用中国地震动参数区划图(GB18306—2015)中的地震动峰值加速度表征。工程地质数据由基础地质图和《河北省水文地质工程地质志》^[26]综合整理而成,应用9类工程岩组表征(图4)。水文地质数据由京津冀三地的水文地质图综合整理,采用岩组与含水性组合表示(图5)。地质灾害数据由多个图集综合整理而成^[22,27—28],将其作为环境地质特征描述指标和各个地质灾害敏感性评价模型变量^[20]。在研究华北平原水资源和水环境状况的基础上,选择地下水地质环境功能、浅层地下水水质、地下水调蓄和地下水可持续利用4类指标刻画地下水环境特征^[21]。

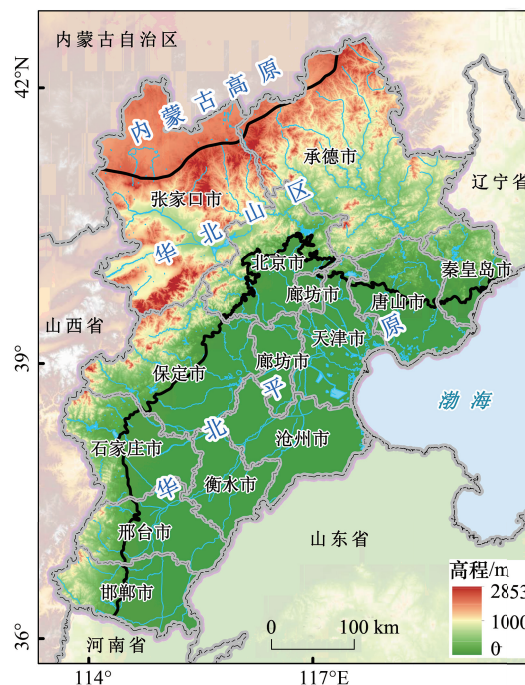


图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

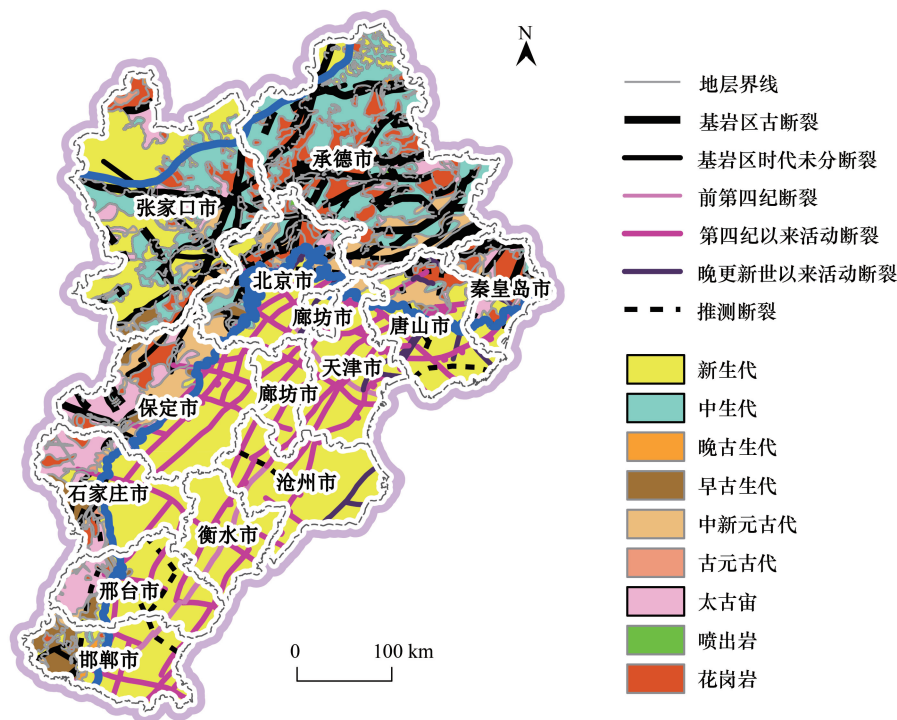


图 2 地质图^[22]

Fig.2 Geological map

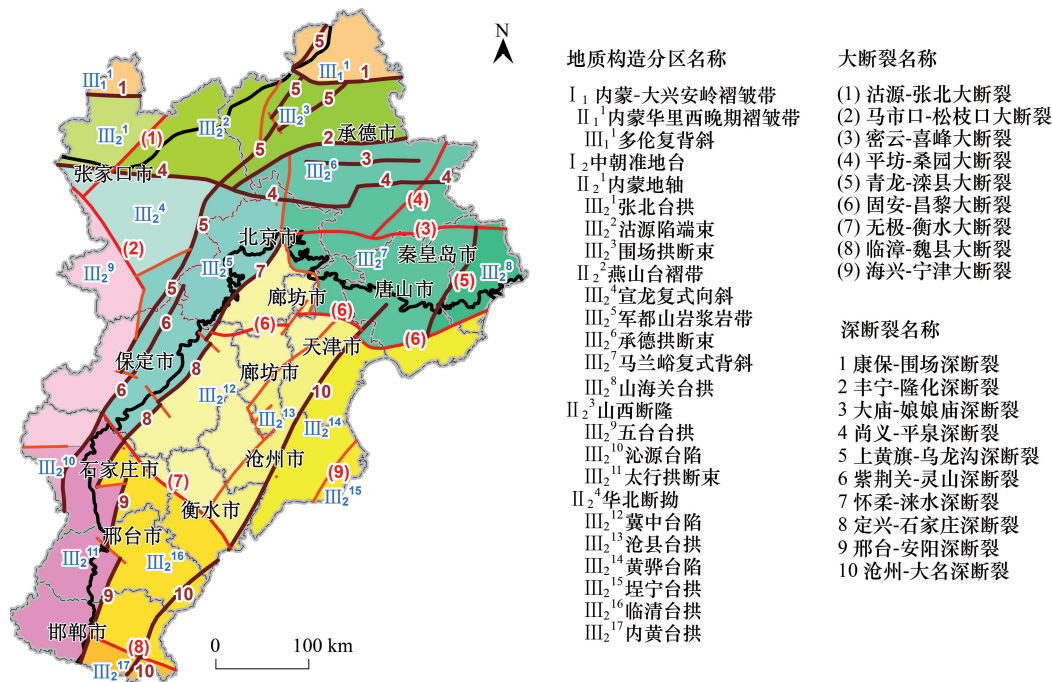


图 3 地质构造分区图^[25]

Fig.3 Geological structure zoning map

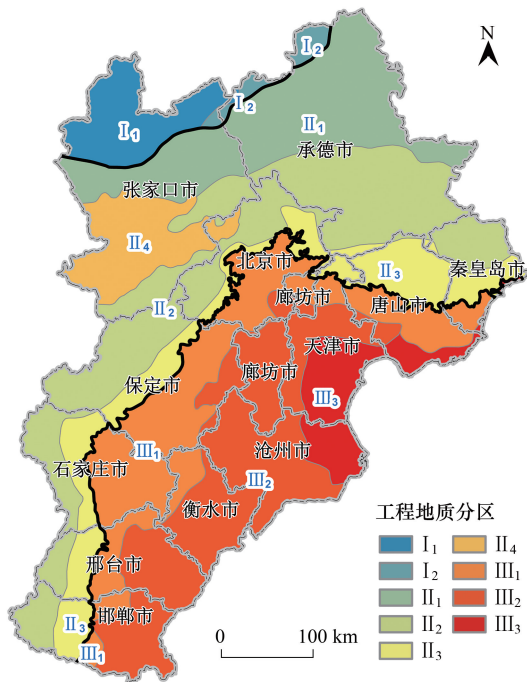
图4 工程地质分区图^[26]

Fig.4 Engineering geological zoning map

I₁:以坚硬半坚硬及松散岩层为地基的西部波状高原工程地质亚区; I₂:以坚硬半坚硬岩石为主要地基的东部垆状高原工程地质亚区; II₁:以坚硬半坚硬岩层为地基的冀北中山宽谷工程地质亚区; II₂:以坚硬半坚硬岩层为地基的中低山峡谷工程地质亚区; II₃:以坚硬半坚硬及松散岩层为地基的丘陵宽谷工程地质亚区; II₄:以松软及坚硬半坚硬岩层为地基的冀西北低山盆地工程地质亚区; III₁:以松软岩层为主要地基的山前洪积、冲积倾斜平原工程地质亚区; III₂:以松软岩层为地基的河北中部冲积湖积低平原工程地质亚区; III₃:以松软岩层为地基的滨海冲积湖积平原工程地质亚区

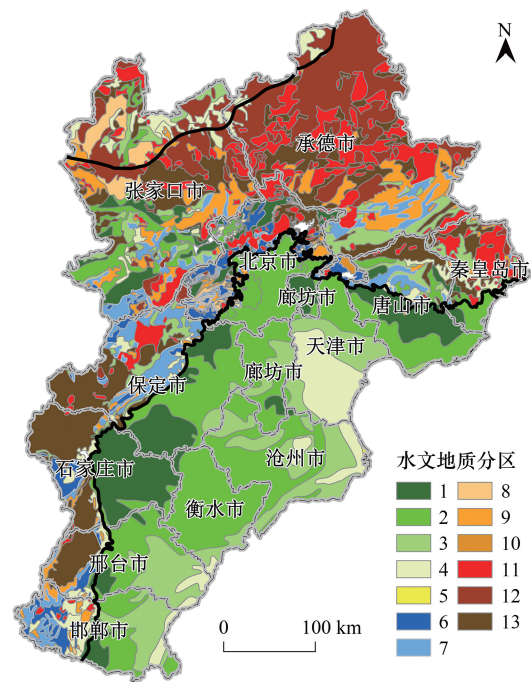


图5 水文地质分区图

Fig.5 Hydrogeological zoning map

1: 松散岩类孔隙水-富水极强; 2: 松散岩类孔隙水-富水强; 3: 松散岩类孔隙水-富水中等; 4: 松散岩类孔隙水-富水弱; 5: 松散岩类孔隙水-富水极弱; 6: 碳酸盐岩裂隙岩溶水-富水强; 7: 碳酸盐岩裂隙岩溶水-富水中等; 8: 碎屑岩类裂隙水-富水中等; 9: 碎屑岩类裂隙水-富水弱; 10: 碎屑岩类裂隙水-富水极弱; 11: 侵入岩类含水岩组-富水弱; 12: 喷出岩类含水岩组-富水弱; 13: 变质岩类含水岩组-富水弱

3 评价方法与指标体系构建

3.1 评价目标与原则

环境地质评价坚持问题导向和因地制宜的原则,按照一级地质地貌分区及区内环境地质问题类型和形成机制,将研究区划分为两个片区,内蒙古高原-华北山区片区主要考虑重力型地质灾害和土地沙化敏感性,华北平原片区主要考虑地裂缝、地面沉降、土地沙化、土壤盐渍化及地下水环境等敏感性。采取地表与地下要素评价相结合的原则,除了考虑地表的环境地质敏感性,还兼顾地下水的环境地质敏感性,纳入地下水环境子系统及其涉及的四个单项环境地质要素。采用“状态-压力-响应”模型指导指标遴选,纳入地下水地质环境功能等环境本底状态指标,选择地面沉降等环境地质灾害压力指标,考虑地下水可持续利用等响应指标。根据数据可获取性和时空精度,采取有限评价和有效综合的原则。区域尺度的土壤和地下水等相关地球化学数据收集有限,未纳入评价体系;深层地下水相关情况在地面沉降评价中考虑,未将其单列评价;因山洪、水土流失与泥石流敏感性评价存在指标选取重复和空间分布相似等特点,两者未纳入评价;崩塌和滑坡在空间分布上存在较强相似性,将两者的敏感性评价归为一类,称之为崩塌-滑坡敏感性评价。

3.2 评价方法

环境地质敏感性评价主要使用层次分析法和敏感性系数法^[19]。层次分析法用于计算单项土地沙化敏感

性和综合环境地质敏感性,构建评价指标间的判断矩阵,确定评价指标间的重要性关系,在判断矩阵通过一致性检验的基础之上,获得准则层和指标层的权重,通过加权求和的方式计算总敏感性。敏感性系数法中的敏感性系数用作定量表达不同因子对环境地质灾害(问题)的敏感程度^[29-30]:

$$S_{ci} = \ln \frac{N_i / A_i}{N / A} \quad (1)$$

式中, N_i 为第 i 类影响因素下的灾害点个数, A_i 为第 i 类影响因素下的面积, N 为灾害总数, A 为研究区总面积。 S_{ci} 为敏感性系数,值越大则敏感性程度越高;值越小或为负,则敏感性越低,不易导致环境地质灾害(问题)的发生。先计算各类影响因素的各个分级敏感性系数,再将各个指标求和得到总敏感性系数。敏感性系数法用于计算崩塌-滑坡、泥石流、地面塌陷和地裂缝 4 类单项环境地质敏感性。

为了将计算获得的总敏感性结果与地下水环境和土壤盐渍化等成果统一刻画尺度,对计算结果均做归一化处理,将其定义为环境地质敏感性指数 (Environmental Geological Sensitivity Index, EGSI), EGSI 数值介于 0—1 之间,值越高者敏感性程度越高。

3.3 评价指标体系构建

借鉴已有环境地质评价成果^[19-22],将评价指标体系构建划分为单项环境地质敏感性评价和综合环境地质敏感性评价两个层次。单项环境地质敏感性评价中的崩塌-滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝和土地沙化,通过指标遴选分别构建各自的评价指标体系(图 6)。地面沉降敏感性评价借鉴监测成果^[22]和相关研究成果^[31],将地面沉降值做归一化处理,用于刻画地面沉降的敏感性水平。根据地质资源-地质环境-人类活动三者之间的作用关系,将地下水环境的 4 个单项环境地质敏感性(地下水地质环境功能、浅层地下水水质、地下水调蓄和地下水可持续利用)和土壤盐渍化的敏感性划分为低、较低、中等、较高和高共计 5 级。

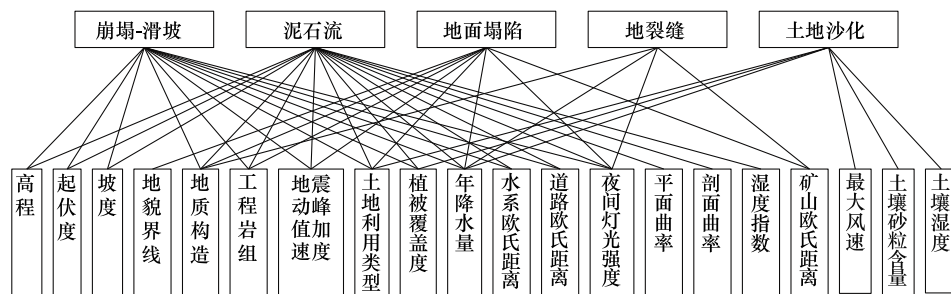


图 6 评价指标体系构成图

Fig.6 Composition of evaluation index system

综合环境地质敏感性评价建立在单项环境地质敏感性评价的基础之上,将土地沙化敏感性和土壤盐渍化敏感性 2 个单项环境地质敏感性归并为土地环境敏感性,将崩塌-滑坡敏感性、泥石流敏感性、地面塌陷敏感性、地裂缝敏感性和地面沉降敏感性 5 个单项环境地质敏感性归并为地质灾害敏感性,将地下水地质环境功能敏感性、浅层地下水质量敏感性、地下水调蓄敏感性和地下水可持续利用敏感性 4 个单项环境地质敏感性归并为地下水环境敏感性,根据收集资料和区内已有研究成果,判别土地环境敏感性、地质灾害敏感性、地下水环境敏感性的权重,进一步拟定各个单项环境地质敏感性的权重(图 7)。

4 结果与分析

4.1 单项环境地质敏感性特征

4.1.1 地质灾害敏感性特征

11 个单项环境地质敏感性结果如图 8 所示。崩塌-滑坡、泥石流、地面塌陷和地裂缝 4 类单项环境地质敏感性应用敏感性系数法计算获得。崩塌-滑坡中、高敏感性区域主要分布在华北山区,其中山地-燕山段和太

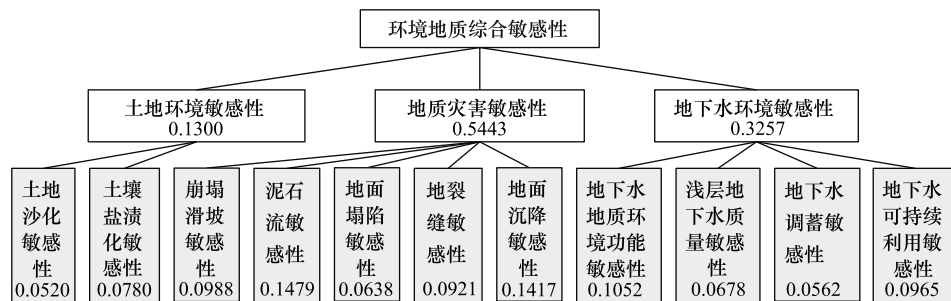


图7 环境地质综合敏感性评价指标体系及其权重

Fig.7 Index system and weight of environmental geology comprehensive sensitivity evaluation

行段敏感性水平最高。评价指标中对敏感性影响较高的要素主要有人类活动、水系、道路、断层、地震、工程地质和坡度等;崩塌、滑坡主要对山区道路、厂矿、居民地和耕地产生直接威胁,同时威胁山区生态廊道的连通性和稳定性。泥石流中、高敏感区主要位于丘陵与山地过渡区,其中在降水相对较多的怀柔-滦平-兴隆-宽城-青龙一线敏感性最高,地形地貌、降水、断裂、工程岩组和土地利用类型的影响较大;泥石流灾害主要对山区道路和耕地产生直接威胁,对河谷及河床地貌的稳定性造成影响,危及山区生态廊道的连通性和稳定性。地面塌陷的中、高敏感区主要位于地貌过渡带、断裂带和山间盆地等区域,并与唐山、承德、保定、邢台和邯郸等采矿活动较为聚集的区域存在较强的空间重合;地面塌陷造成地貌、地表水-地下水系统破坏,影响矿山、耕地和建设用地的安全,干扰生态源地稳定性。地裂缝敏感性指数由西南向东北递减,与平原的地貌梯度、新构造运动、地下水开采与矿产开发等自然和人为因素影响联系密切,在涿州-文安-青县一线的西南形成中高敏感区;地裂缝灾害容易破坏地表水和地下水的水文过程,引起系列岩土地质问题,导致植被破坏和土地利用效率降低,影响线路布局和城市建设等人类工程活动。

地面沉降受地质构造、新构造活动、地层压密和气候等自然因素以及开采地下流体、固体矿产和施加各类地表荷载等人为因素的影响^[11,32],而地面沉降又加剧了河湖生态问题^[33]。地面沉降敏感性与降水梯度、地质构造分区、人口密度和经济活动分布表现出复杂的空间关联,尤其是与农业采用地下水区和传统低产田区关系较为密切^[34],总体形成西部低、中部高、东部较高的空间格局。在昌平-通州、北辰-文安-津南、高阳、东光、南宫-鸡泽等地形成中、高敏感性集中分布区,这些区域靠近沧州-大名深断裂和固安-昌黎大断裂,地跨冀中台陷、沧县台拱、黄骅台陷和临清台拱4个三级地质构造区,工程地质类型主要是以松软岩层为地基的冲积湖积低平原工程地质亚区,属富水强和较强的松散岩类孔隙水区,地质环境影响显著。

4.1.2 土地环境敏感性特征

土地沙化敏感性总体表现为内蒙古高原→华北平原→华北山区的递减趋势。区内土地沙化类型主要为草原风蚀沙地和黄土丘陵风蚀沙地,主要分布在内蒙古高原,其中怀安-赤城-丰宁-围场以北的沙化敏感性最高;其他地区的沙化主要分布在环渤海区域以及河滩和湿地周边排水区。土壤盐渍化表现出与海相环境及沉积环境的高度相关性,高敏感区分布在渤海湾唐山-天津-沧州一线的滨海地区,中等敏感区主要分布于平原中河流泛滥冲积形成的河道和河间洼地,冲洪积扇及古河道的高地盐渍化较轻^[35]。

4.1.3 地下水环境敏感性

地下水地质环境功能敏感性格局受冲洪积扇及衍生工程地质和水文地质条件影响,形成西高东低的格局。浅层地下水质量敏感性宏观空间格局与冲洪积扇的边缘大体一致,在华北平原二级地貌单元表现出东高西低的特征,与环渤海地形地貌特征格局吻合度较高。华北平原的地下水调蓄敏感性呈现东高西低的分布特征,宏观上与冲洪积扇东侧边界存在空间上的重合;具有理想储水空间的调蓄区依次为山前冲洪积扇卵砾石带、冲积扇中粗砂含砾石带和平原古河道带^[36]。地下水可持续利用在平原西部区具有较强的稳定性,敏感性较低,而平原东部区则相反;区内咸水、微咸水大量分布、地下水水位持续下降、地面沉降、地裂缝、极端干旱气

候和地下水污染均影响地下水可持续开发^[37],除石家庄、邢台、沧州、廊坊和衡水等超采和严重超采区外,平原浅层地下水开采潜力整体一般^[38]。

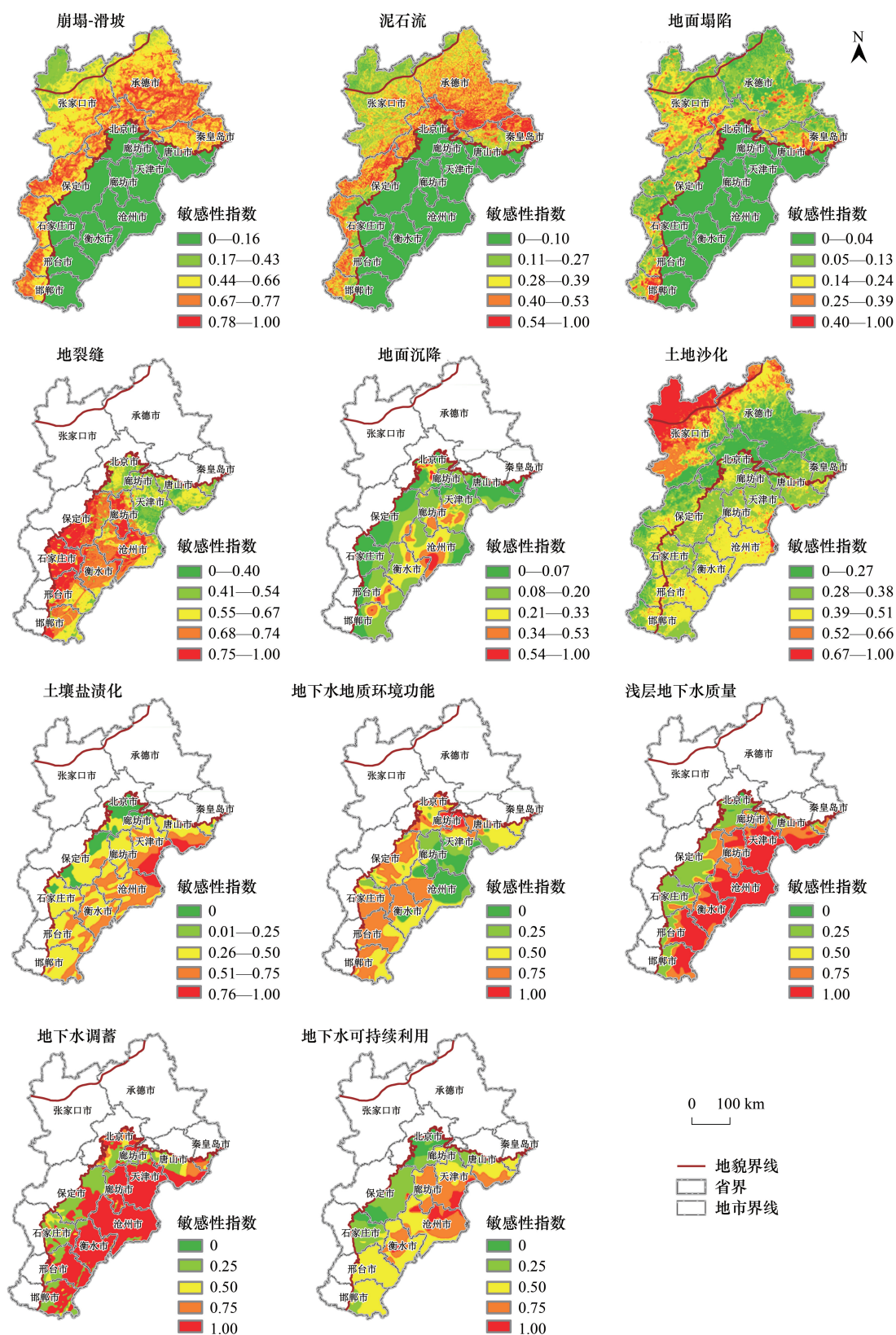


图 8 单项环境地质敏感性图

Fig.8 Environmental geological sensitivity of single element

4.2 综合环境地质敏感性特征

4.2.1 综合环境地质敏感性空间格局

在单项环境地质敏感性评价的基础上,按照加权求和的方式获取全区的综合环境地质敏感性指数,参照自然间断法^[39]进行归一化后的综合 ESGI 五级划分:强(>0.75)、较强 $[0.60—0.75]$ 、中等 $[0.45—0.60]$ 、较弱 $[0.38—0.45]$ 和弱(<0.38)(图 9)。综合 ESGI 呈现出西北低、东南高的空间分异格局,华北平原环境地质敏感性最高,环渤海及平原东南部的环境地质问题较为突出。内蒙古高原区平均 ESGI 为 0.33,主要呈现出弱敏感区聚集,局部呈现散点状中等敏感区分布;华北山区平均 ESGI 为 0.40,在上黄旗-乌龙沟深断裂和密云-喜峰大断裂等地质构造复杂区及丘陵与山地过渡带形成中等敏感区聚集;华北平原平均 ESGI 为 0.64,在泛滥平原和黄泛平原以东形成高敏感区聚集,地质构造分区属于沧县台拱、黄骅台陷和临清台拱,在平原西部形成中等敏感区聚集。土地利用等人类活动与环境地质敏感性存在较强的相关性。华北平原的湿地、耕地和人工表面三种地类的 ESGI 分别为 0.71、0.65 和 0.61,靠近滏阳河、清凉江和滏东排河等地的传统低产田区环境地质问题尤为突出。华北山区人工表面和林地的 ESGI 较之其他地类高。内蒙古高原仅林地 ESGI 略高于其他地类,草地 ESGI 最低,其他四个地类的 ESGI 几乎处于相同水平。

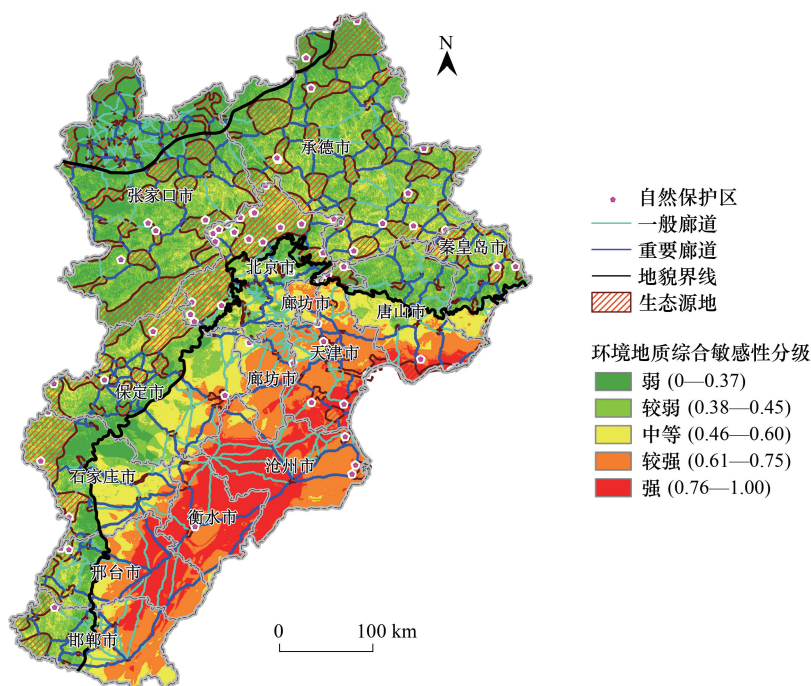


图 9 环境地质综合敏感性分级与生态安全格局要素叠加

Fig.9 The superposition of the comprehensive sensitivity classification of environmental geology and the elements of ecological security pattern

4.2.2 环境地质的生态安全格局影响

借鉴区内已构建的生态网络^[40],分析环境地质敏感性与生态安全格局要素的空间关系(图 9)。统计的 67 个自然保护区中有 12 个平原区的自然保护区属于环境地质强或较强敏感区,6 个华北山区的自然保护区属中等敏感区。华北山区的生态源地 ESGI 处于较弱水平,华北平原生态源地的平均 ESGI 为 0.67,属较强水平。在华北山区及内蒙古高原,接近一半的重要廊道地处中等、较强、强三级环境地质敏感区。在华北平原,超过 90%的重要廊道位于强、较强和中等三级环境地质敏感区,其中沧州、衡水和邢台等地的主要生态廊道贯通性受到较大影响。

4.3 综合环境地质敏感性区划

华北平原区的单项敏感性和综合敏感性均反映出较强的东西经向差异和南北纬向差异,地质地貌及边界效应、地质构造及分区、工程地质和水文地质的影响显著^[34]。以地质地貌分区作为环境地质区划的主要依据,参照综合 EGSi 空间统计特征,结合自然因素与人为因素的空间梯度,划定 3 个一级环境地质敏感区和 16 个环境地质敏感亚区(图 10)。在各个分区的环境地质特征分析中考虑生态功能区划、生态源地和重要生态廊道的影响,探讨环境地质与生态环境的防治对策。

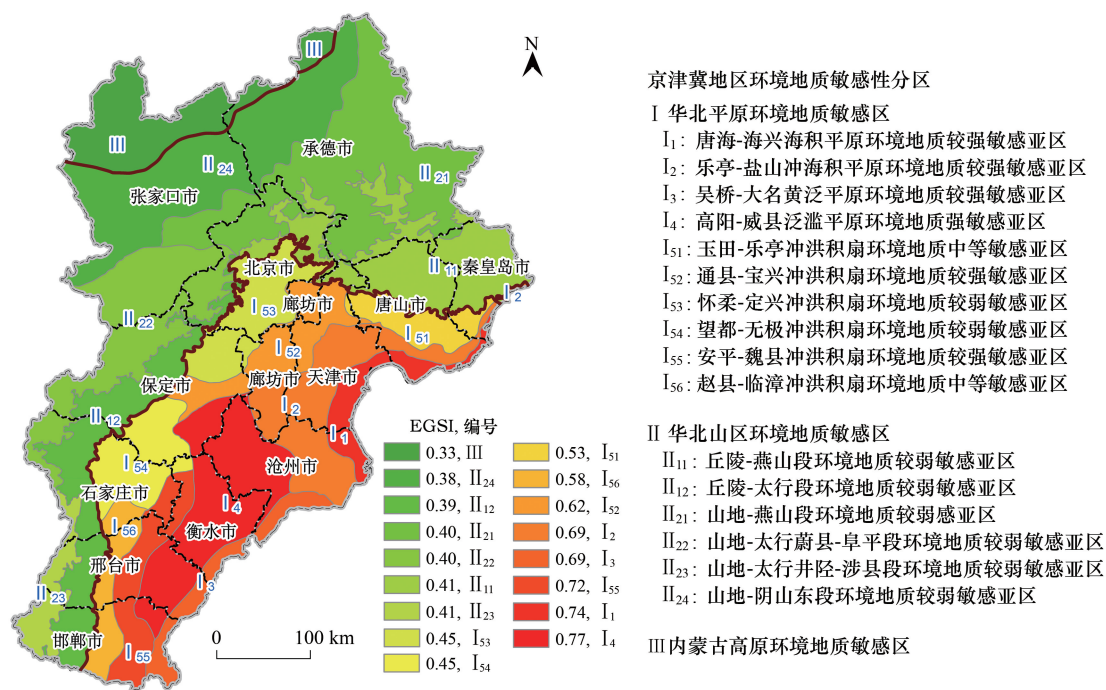


图 10 京津冀地区环境地质敏感性区划图

Fig.10 Environmental geological sensitivity zoning map of the Beijing-Tianjin-Hebei region

EGSi: 环境地质敏感性指数 Environmental Geological Sensitivity Index

4.3.1 华北平原环境地质敏感区

华北平原环境地质敏感区主体受北东-南西向深大断裂控制,地跨华北断拗,西部山前平原部分区域属燕山台褶带和山西断隆。区内主要出露全新世海相堆积和陆相流水堆积,从西向东地跨 3 个松软岩层工程地质亚区,水文地质类型为松散岩类孔隙水,由富水性极强降至富水性弱。区内耕地面积占 68%、人工表面 22%、林地 3%、草地 1%、湿地 5%和其他 1%,主要涉及油气、非金属矿产和地热等地质矿产和能源开发。该区共划分 10 个环境地质敏感性亚区,单项和综合环境敏感性指数总体呈现东高西低的格局(表 1)。该区主体生态功能为农产品提供和人居保障,其中大都市群功能极其突出,浅层和深层地下水开发及其诱发的系列环境地质问题与生态环境产生复杂的交互作用关系。

唐海-海兴海积平原环境地质较强敏感亚区(I₁):深层地下水超采和严重超采面积约 2700 km²,严重沉降区面积约 400 km²。土壤盐渍化、浅层地下水质量和地下水调蓄的 3 类敏感性指数为华北平原区最高,地下水可持续敏感性较强。该区需要控制土壤盐渍化,做好浅层地下水污染治理,重点做好津南区和宁河等地的地下水治理;优化海岸带陆海一体统筹开发格局,重点加强唐海、北大港、南大港和海兴等湿地和鸟类自然保护区的建设和保护,有序开展受损滨海湿地的修复工作。

乐亭-盐山冲海积平原环境地质较强敏感亚区(I₂):浅层地下水超采区面积约 900 km²,深层地下水严重超采区面积约 1400 km²。浅层地下水质量和地下水调蓄敏感性强、地下水可持续利用敏感性较强,盐渍化敏

感性中等。需要控制地势低洼处的土壤盐渍化,做好浅层地下水污染防治,加强北辰区、西青区、静海、文安和仓县等地的地面沉降和地裂缝治理;推进七里海水库、大黄堡湿地自然保护区和团泊鸟类自然保护区等生态源地的环境保护,加强海河与永定河等重要生态廊道的保护与重点区段的生态修复。

表 1 华北平原各环境地质亚区的环境地质敏感性指数均值

	亚区 Subregion									
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅₁	I ₅₂	I ₅₃	I ₅₄	I ₅₅	I ₅₆
地裂缝 Ground fissure	0.45	0.58	0.60	0.69	0.53	0.59	0.58	0.73	0.70	0.72
地面沉降 Land subsidence	0.12	0.17	0.16	0.24	0.03	0.08	0.10	0.04	0.12	0.04
土地沙化 Desertification	0.49	0.42	0.41	0.44	0.36	0.35	0.35	0.38	0.39	0.40
土壤盐渍化 Soil salinization	0.76	0.45	0.44	0.37	0.29	0.27	0.08	0.19	0.34	0.26
地下水地质环境功能 Geological environment function of groundwater	0.16	0.20	0.48	0.55	0.57	0.57	0.60	0.61	0.70	0.72
浅层地下水质量 Shallow groundwater quality	0.99	0.94	0.92	0.90	0.60	0.74	0.36	0.27	0.79	0.39
地下水调蓄 Groundwater regulation and storage	1.00	0.96	0.77	0.97	0.51	0.80	0.51	0.36	0.79	0.52
地下水可持续利用 Sustainable utilization of groundwater	0.83	0.68	0.51	0.56	0.40	0.46	0.16	0.17	0.51	0.40
综合 EGSI Comprehensive EGSI	0.74	0.69	0.69	0.77	0.53	0.62	0.45	0.45	0.72	0.58

吴桥-大名黄泛平原环境地质较强敏感亚区(I₃):浅层地下水超采区面积约 336 km²,深层地下水超采区面积约 3045 km²,严重沉降区面积约 1038 km²,地裂缝高发区面积约为 31.61%。地下水地质环境功能和地下水可持续利用敏感性中等,地下水调蓄敏感性较强,浅层地下水质量敏感性强。需要加强吴桥和东光等地的地面沉降监测与治理,防治清河和大名等地的地裂缝,加强浅层地下水污染防治;加强漳河、漳卫新河和京杭运河及沿线等生态廊道保护。

高阳-威县泛滥平原环境地质强敏感亚区(I₄):浅层地下水超采面积占比约 36.37%,深层地下水超采和严重超采面积约占 71.26%,严重沉降区面积约 4200 km²,地面沉降敏感性为全区最高,同时伴生地表温度和温度植被干旱指数偏高等生态问题,反映出地质背景对生态环境的重要影响;该区分布地裂缝 200 多处,地裂缝高发区面积占比约 34.01%。浅层地下水质量和地下水调蓄敏感性强,地下水地质环境功能和地下水可持续利用敏感性中等。该区需要积极发展生态节水农业,重点加强高阳、武强、东光、南宫和平乡等地的地面沉降治理,防治蠡县和饶阳等地的地裂缝灾害,加强浅层地下水污染防治;加强衡水湖和白洋淀等重要生态源地的建设与保护,提升滏阳新河、子牙河和清凉江等主要河流及沿线生态廊道保护。

冲洪积扇的 5 个环境地质敏感性亚区主要环境地质问题为地裂缝、地面沉降和局部土壤盐渍化,土地沙化和地下水环境敏感性相对较弱。洪积扇环境地质中等敏感亚区(I₅₁)需要加强地震活跃及活动断裂发育区的地质环境变化监测,加强玉田等地的地面沉降治理,加强唐山市及周边的地裂缝灾害防治。通县-宝兴冲洪积扇环境地质较强敏感亚区(I₅₂)需要控制土壤盐渍化,监测和治理地面沉降,加强保定和霸州等地的地裂缝防治;加强白洋淀湿地等重要生态源地的生态保护和修复工作,做好雄安重点生态安全保障地区生态建设工作,提升永定河、潮白河和大清河等重要生态廊道的生态功能。怀柔-定兴冲洪积扇环境地质较弱敏感亚区(I₅₃)需要重点疏解北京非首都功能,优化区域人类活动空间格局;积极推进和深化城市地质环境调查、监测和治理工作,加强地震及活动断裂监测;加强顺义、通州和固安等地的地面沉降防治,强化涿州市及周边的地裂缝治理;积极提升城市及近郊生态源地保护和生态服务功能,发挥南水北调工程的补水效应,加强潮白河、永定河和拒马河等重要水系的生态修复。望都-无极冲洪积扇环境地质较弱敏感亚区(I₅₄)需要加强望

都、安国和新乐等地的地裂缝防治,做好滹沱河、沙河和南水北调工程等重要廊道及其沿线的生态保护和治理。安平-魏县冲洪积扇环境地质较强敏感亚区(I_{55})需关注地震及活动断裂的环境地质影响,加强曲周等地的地面沉降治理,做好深州、隆尧、任县和肥乡等地的地裂缝防治;提升沙河与滏阳河等水系的生态廊道功能,在新河以北等区域发展生态节水农业。赵县-临漳冲洪积扇环境地质中等敏感亚区(I_{56})需要加强柏乡、邢台和永年等地的地裂缝灾害防治,做好滏阳河、沙河和南水北调工程及沿线的生态保护。此外,上述区域还需要加强局部土地沙化和土壤盐渍化的防治。

华北平原区需要围绕湿地生态系统恢复,实施多种措施以增强环境地质韧性:通过优化域外调水模式,调整工农业和城市产业发展结构,结合工程、管理和技术手段提高用水效率,逐步缓解华北平原的缺水问题^[41];借助南水北调工程和河流滩地治沙工程,修复河流生态,重点恢复河流的自然连通性,消除河流的过度人工化和渠道化的影响,还原河流自然形态,积极实施河道生态护岸形式^[42];修复洼地区域的湖泊洼淀生态,加强不同湿地之间的水资源交换,改善水质;持续推进地下水位恢复工作,实施限采,结合人工和自然回灌的方式恢复地下水系统,逐步实现地下水对地表生态稳定的支撑作用;从流域层面统筹考虑河流防洪、水利和生态等不同需求,在保障防洪和供水安全的同时,兼顾下游河道的生态需水量,控制水库等设施对河道生态的影响^[43];加强城市及其周围环境地质问题治理,推进环境地质协同治理。

4.3.2 华北山区环境地质敏感区

本区受近东西向和北东向的深大断裂控制,地跨燕山台褶带和山西断隆两个二级地质构造分区;太古宙、中新元古代、中生代和新生代地层分布较广,出露前寒武纪至印支期 5 个期次的花岗岩,局部出露晚古生代和中生代喷出岩;地跨 4 个工程地质亚区,涵盖 7 种水文地质类型。区内林地面积占 59%、耕地 22%、草地 12%、人工表面 5%、湿地 1% 和其他 1%;矿产资源开发较为活跃,分布煤矿 30 多座、金属矿山 90 多座、非金属矿山 200 多座。该区作为“三北防护林”的重要组成部分,主体生态功能包括水源涵养和农产品提供,局部的高强度采矿和城乡建设等活动引起的环境地质问题对生态环境产生点状和线状扰动。

丘陵-燕山段环境地质较弱敏感亚区(II_{11})需要重点加强双滦和双桥等地的矿山地质环境保护治理,加强密云、蓟县和青龙等地的地质灾害防治;有效提升密云、于桥、潘家口、丘庄和洋河等水库及云峰山、盘山、老岭和白草洼等生态源地的生态服务功能,强化潮河、滦河和青龙河等主要水系的生态廊道作用。丘陵-太行段环境地质较弱敏感亚区(II_{12})需要重点加强井陘和峰峰等矿山地质环境治理,做好丘陵与山地过渡带等关键区域的地质灾害防控,重视易县-曲阳等供水潜力区的地质环境保护;加强拒马河和石花洞等重要生态源地的建设工作,提升永定河、拒马河、漕河、唐河和沙河等重要水系的生态廊道作用,优化王快、唐河、岗南、黄壁庄、朱庄和岳城等水库的水资源调节和生态服务功能。在丘陵地区需要科学优化耕地和建设用地空间分布格局,通过绿化工程进一步提升山原过渡地带的生态韧性。

山地-燕山段环境地质较弱敏感亚区(II_{21})需要加强延庆、鹰手营子、滦平、隆化和平原等地的矿山地质环境治理与保护,做好兴隆与怀柔等地的地质灾害防治。山地-太行蔚县-阜平段环境地质较弱敏感亚区(II_{22})需要重点加强蔚县和阜平等地矿山环境恢复治理,做好蔚县-涞源等地供水潜力区地质环境保护,加强区域地质灾害防治。山地-太行井陘-涉县段环境地质较弱敏感亚区(II_{23})需要重点解决涉县等地的矿山环境地质问题,关注涉县等地供水潜力区地质环境保护。山地-阴山东段环境地质较弱敏感亚区(II_{24})需要加强宣化-张北等地矿山环境治理,强化隆化-崇礼等二级地貌界线过渡带关键区域的地质灾害防治,综合运用生态工程防治土地沙化等环境地质问题。山地区域需要进一步强化生态工程建设成果,大力提升自然保护区和优质林地与草地的生态源地功能,强化河流和谷地等生态空间的廊道作用。

根据京津冀生态功能区规划,华北山区需要统筹做好崩塌、滑坡、泥石流和塌陷等地质灾害的防治工作,重点做好水源地、矿区、山间盆地和河谷区重要设施工程及周边地区的环境地质问题防治;在矿区防治废渣和尾矿污染,开展采坑、地面塌陷、地面沉降和地裂缝等灾害治理,做好地形地貌整治,改善植被覆盖度,控制水土流失,恢复矿区生态环境^[7];统筹实施全域生态环境规划,因地制宜地优化土地利用结构,开展流域综合治

理,控制水土流失和泥石流等环境问题。

4.3.3 内蒙古环境地质敏感区

内蒙古环境地质敏感区(Ⅲ)受沽源-张北大断裂和上黄旗-乌龙沟深断裂控制,地跨张北台拱、沽源陷断束、围场拱断束和多伦复背斜4个地质构造区。区内主要出露太古代、古元古代、晚古生代、中生代和新生代地层,局部出露中生代喷出岩,另有前寒武纪、华力西期和燕山早期花岗岩分布。区内耕地面积占49%、草地36%、林地占6%、人工表面占5%、湿地2%、其他2%,主要开发非金属和金属矿产。该区的主体生态功能为防风固沙和农产品提供,地表环境地质问题与生态环境存在较强的互馈效应。区内崩塌、滑坡、泥石流和塌陷以小型和中型为主,大型泥石流35处。高原丘陵区环境地质敏感性主要受崩塌、滑坡、泥石流灾害控制,高平原区环境地质敏感性主要受土地沙化和地面塌陷控制。该区沙化敏感性指数为0.74,属全区最高;崩塌-滑坡、泥石流和地面塌陷的敏感性指数分别为0.39、0.21和0.12。针对本区的风沙防治等主体功能,需要分区做好环境地质问题防治。在丘陵区做好山洪和泥石流防治,在波状高原做好湿地恢复、地下水位下降监测和防治,在丘状高原做好土地沙化防治,同时加强波状高原的湖淖和河道等区域的土壤盐渍化治理,在垄状高原区通过植物工程等手段防治水土流失^[44]。

5 结论

(1)集成多源数据有效地挖掘了环境地质空间格局及其环境效应的相关信息。本文集成了京津冀地区不同时期的地理、生态、基础地质、工程地质、水文地质和环境地质等多源异构数据,有针对性地开展了一部分历史地质数据的收集、校验和信息加工,分析了地质环境和地质资源对人类活动空间分布的重要影响,解析了地质、地理和生态三类空间的交互作用关系。

(2)环境地质敏感性与地貌梯度存在较好的耦合。综合环境地质敏感性指数呈现出西北低、东南高的格局,华北平原环境地质敏感性最高,环渤海及东南部环境地质问题最为突出。华北平原地下水超采导致地面沉降和地裂缝并衍生出水环境问题,影响地下水可持续利用,加剧了区域环境地质的敏感性,如高阳-威县泛滥平原环境地质强敏感亚区和安平-魏县冲洪积扇环境地质较强敏感亚区等区域;华北山区由于城乡建设和采矿等活动导致局部重力型地质灾害问题突出,区域尺度的地质灾害敏感性主要受自然因素影响;内蒙古高原的土地沙化和局部泥石流灾害影响较大,需要考虑自然因素作用下的人类活动适应和调整。

(3)京津冀地区环境地质敏感性为区域生态管理提供科学依据。区内单项环境地质敏感性与其伴生的地质和地理空间存在较强的系统关联,同时表现出显著的“状态-压力-响应”空间分异。考虑到京津冀地区的生态系统协同建设和保护,在研究和实践中可进一步关注地质、地理和生态的各种要素、子系统和系统在环境地质中的功能及效应;在管理方面,统筹全域国土空间规划,协调人地关系;在技术方面,加强地貌过渡带及城乡关键区域的主要环境地质问题治理,全面提升关键生态源地、廊道和节点的韧性;在生态与环境地质保护的实施方面,以燕山和太行山为生态源地质量提升的主攻区域,以环绕首都和大中型城市的城乡交错带生态功能强化为突破,以海岸线、重要河流和高等级道路及沿线作为生态廊道建设重点;全面实现城乡协同、生态协同和环境协同,建设环境地质发展共同体。

(4)本研究还存在可改进的方面。可进一步深化研究环境地质要素、子系统、系统之间的作用关系,挖掘城市及周边和地貌过渡带等关键区域的环境地质敏感性机理,进一步提高数据时空精度,优化人类活动方面的指标选取,针对环境地质特点改进单项敏感性和综合敏感性的评价方法。

参考文献(References):

- [1] 哈承祐. 环境地质研究进展与展望. 地质通报, 2006, 25(11): 1247-1256.
- [2] 张永双, 孙璐, 殷秀兰, 孟晖. 中国环境地质研究主要进展与展望. 中国地质, 2017, 44(5): 901-912.
- [3] 徐绍史. 中国地质学学科史. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [4] 张宗祜. 环境地质与地质灾害. 第四纪研究, 2005, 25(1): 1-5.

- [5] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 1-8.
- [6] 赵永久. 矿山环境地质灾害问题及其勘查方法. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 104-108.
- [7] 葛荣凤, 许开鹏, 迟妍妍, 王晶晶, 张力小, 张箫, 张丽苹. 京津冀地区矿产资源开发的生态环境影响研究. 中国环境管理, 2017, 9(3): 46-51.
- [8] 娄华君, 王宏, 夏军, 赵树贤. 地质信息可视化的应用——城市环境地质研究之发展方向. 中国地质, 2002, 29(3): 330-334.
- [9] 徐争启, 倪师军, 张成江, 庾先国. 我国城市环境地质研究现状及应注意的几个问题. 国土资源科技管理, 2006, 23(1): 100-103.
- [10] 孟晖, 李春燕, 张若琳, 李亚民. 京津冀地区县域单元地质灾害风险评估. 地理科学进展, 2017, 36(3): 327-334.
- [11] 于海若, 宫辉力, 陈蓓蓓, 刘凯斯. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考. 测绘科学, 2020, 45(4): 125-133, 141-141.
- [12] 宫辉力, 李小娟, 潘云, 朱琳, 张有全, 陈蜜, 陈蓓蓓, 柯樱海, 王彦兵, 高明亮, 黄志勇, 李勇永. 京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律. 中国科学基金, 2017, 31(1): 72-77.
- [13] 张永红, 吴宏安, 康永辉. 京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测. 测绘学报, 2016, 45(9): 1050-1058.
- [14] Shi M, Gong H L, Gao M L, Chen B B, Zhang S K, Zhou C F. Recent ground subsidence in the North China Plain, China, revealed by sentinel-1A datasets. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3579.
- [15] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 王海刚. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究. 中国地质, 2017, 44(6): 1115-1127.
- [16] 席北斗, 李娟, 汪洋, 唐军, 洪慧. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策. 环境科学研究, 2019, 32(1): 1-9.
- [17] 李翔, 汪洋, 鹿豪杰, 洪慧, 肖超, 李娟, 席北斗. 京津冀典型区域地下水污染风险评价方法研究. 环境科学研究, 2020, 33(6): 1315-1321.
- [18] 李晓, 黄琬云, 侯佳均, 胡伟. 地下水污染指示性因子指标体系构建. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(4): 99-102.
- [19] 赵银兵, 陈利顶, 孙然好, 倪忠云, 别小娟. 地质灾害易发性评价方法对比研究: 以京津冀地区为例. 环境生态学, 2020, 2(4): 27-38, 50-50.
- [20] 侯春堂, 刘晓端. 华北平原水土地质环境图集. 北京: 地质出版社, 2010.
- [21] 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水可持续利用图集. 北京: 中国地图出版社, 2009.
- [22] 国土资源部. 京津冀地区国土资源与环境地质图集. 北京: 国土资源部, 2015.
- [23] 马震, 谢海澜, 林良俊, 胡秋韵, 钱永, 张素荣, 王贵玲, 李建国, 谭成轩, 郭海朋, 张福存, 赵长荣, 刘宏伟. 京津冀地区国土资源环境地质条件分析. 中国地质, 2017, 44(5): 857-873.
- [24] 河北省地方志编纂委员会. 河北省志(第3卷)·自然地理志. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1993.
- [25] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989.
- [26] 河北省地质局水文地质工程地质编写组. 河北省水文地质工程地质志. 石家庄: 河北省地质局水文地质工程地质编写组, 1981.
- [27] 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 河北省地质灾害图集. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2014.
- [28] 中国地质环境监测院. 中国典型县(市)地质灾害易发程度分区图集: 华北东北卷. 北京: 科学出版社, 2011.
- [29] 唐川. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析. 地理研究, 2005, 24(2): 178-185.
- [30] 倪树斌, 马超, 杨海龙, 张熠昕. 北京山区崩塌、滑坡、泥石流灾害空间分布及其敏感性分析. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 81-91.
- [31] Gong Y L, Li J T, Li Y X. Spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of arable land in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1990-2015. Socio-Economic Planning Sciences, 2020, 70: 100720.
- [32] 徐佳, 王巍, 韦劲松, 解大可. 天津市地面沉降多因素分析. 地下水, 2012, 34(4): 205-207.
- [33] 郝利霞, 孙然好, 陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价. 环境科学, 2014, 35(10): 3692-3701.
- [34] Zhao Y B, Sun R H, Ni Z Y. Identification of natural and anthropogenic drivers of vegetation change in the Beijing-Tianjin-Hebei megacity region. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1224.
- [35] 吴忱. 华北平原河道变迁对土壤及土壤盐渍化的影响. 地理学与国土研究, 1999, 15(4): 70-75.
- [36] 许广明, 刘立军, 费宇红, 李铎, 钱永. 华北平原地下水调蓄研究. 资源科学, 2009, 31(3): 375-381.
- [37] 王昭, 石建省, 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水中有有机物淋溶迁移性及其污染风险评价. 水利学报, 2009, 40(7): 830-837.
- [38] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 陈京生, 张凤娥, 王昭. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 890-897.
- [39] 李乃强, 徐贵阳. 基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析. 测绘通报, 2020, (4): 106-110, 156-156.
- [40] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 汪翡翠, 刘金雅, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4383-4392.
- [41] 秦欢欢, 孙占学, 高柏. 农业节水和南水北调对华北平原可持续水管理的影响. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1716-1724.
- [42] 姚小琴, 窦华港. 天津海河廊道的生态修复. 城市规划, 2009, 33(S1): 66-70.
- [43] 李树元. 海河流域生态环境关键要素演变规律与脆弱性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [44] 马小雷, 孟军省, 付丹平. 典型生态脆弱区环境地质问题及防治对策研究——以河北坝上地区为例. 地下水, 2020, 42(2): 122-126.