

解晓茹, 刘若男, 王冠勋, 等. 越南红河三角洲海水入侵风险评估研究[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(4): 16-26.

XIE Xiaoru, LIU Ruonan, WANG Guanxun, et al. Risk assessment of seawater intrusion in the Red River Delta of Vietnam[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(4): 16-26.

越南红河三角洲海水入侵风险评估研究

解晓茹^{1,2}, 刘若男³, 王冠勋³, 余静^{3*}, 范永斌⁴, 张坤理⁵, 吴姗姗¹, 滕欣¹

(1 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072; 3 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100;

4 青岛市海洋管理保障中心, 青岛 266000; 5 中国海洋大学海洋发展研究院, 马克思主义学院军事教学部, 青岛 266100)

摘要:越南红河三角洲是海水入侵的脆弱区,其海水入侵灾害风险评估对区域防灾减灾至关重要。本文开展了海水入侵灾害风险评价指标体系和灾害风险指数的构建方法研究,综合评估了红河三角洲沿海的海防市、太平省、南定省和宁平省的灾害风险及空间分布特征。结果表明:①灾害风险指数介于 0.35~0.67,整体处于较低—较高水平,空间上呈由东南沿海向西北内陆递减的趋势;②危险性指数介于 0.22~0.53,整体处于较低—中等水平,南定省沿海地区、海防市和太平省为高危险区;③暴露性指数介于 0.20~0.87,整体处于较低—高等水平,且研究区的暴露性差异较大,南定省和宁平省东部沿海暴露性较高;④脆弱性指数介于 0.50~0.79,整体处于中等—较高水平,宁平省的脆弱性较突出;⑤海水入侵灾害风险主要受到区域社会经济系统的暴露性和脆弱性影响。应对不同区域特征有针对性的采取防灾减灾措施。本研究可为红河三角洲海水入侵防灾减灾提供参考与支撑。

关键词:海水入侵; 灾害风险; 红河三角洲; 风险评估

中图分类号:P748

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.255

0 引言

海水入侵是咸淡水界面压力失衡而导致海水沿着陆地含水层向陆地方向潜入的现象和过程^[1]。海水入侵会引起地下和地表淡水水质恶化,引发供水紧张,威胁人畜生命安全^[2-4]。海水入侵还会导致土壤盐渍化,造成农作物减产^[5-7]和生态环境破坏^[8-9]。海水入侵灾害已经成为制约全球沿海区域农业、社会和经济发展的的重要因素^[10-12]。三角洲地

区由于地势低平、紧邻海洋,成为海水入侵的敏感区与脆弱区。在海平面上升和沿海人类开发利用活动程度不断加深的背景下,三角洲的海水入侵风险持续增加^[12-14]。因此,开展三角洲地区的海水入侵灾害风险评估研究,对提升三角洲地区的防灾减灾能力具有重要意义。

红河三角洲位于越南北部,是该国第 2 大三角洲。据统计,该地区 2023 年平均人口约 2 373.24 万,人口密度为 1 115.32 人/km²^[15];作为越南北部的经济中心,红河三角洲地区 2022 年生产总值约占越南全国的 1/3^[16]。近年来,红河三角洲海水入侵问题逐渐受到学者们的关注,已有研究从海水入侵的危险性和脆弱性等角度进行了深入探讨。

在危险性研究方面,众多学者用 SEAWAT^[17-18]、MODFLOW^[19-20]、Mike 11^[21]和 Mike 3^[22]等数值模式对河口及地下水盐度进行模拟和预测,研究了气候变化、海平面上升和河流流量变化等因素对盐度的影响,并揭示其物理机制。THUY 等^[23]研究了气候变化和海平面上升对红河三角洲太平省地下水的潜在影响。NGUYEN 等^[24]基于红河-太平

收稿日期: 2024-10-31

资助项目: 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金项目(2022COSIMQ002); 山东省高等学校“青创团队计划”(2022RW13); 亚洲合作资金项目“长江三角洲与红河三角洲海洋地质环境与灾害合作研究”,“中印尼海洋与气候中心发展”(C3240YN02),蓝色伙伴关系背景下海洋空间规划国际合作技术路径与实践(C3220C004),柬埔寨海岸带保护与利用规划编制研究(Y2200C002)

第一作者: 解晓茹(1993—),女,博士,助理研究员,主要从事灾害风险评估方面的研究工作. E-mail: xxrouc@163.com

* 通讯作者: 余静(1978—),女,博士,教授,主要从事灾害风险评估和海洋资源综合管理方面的研究工作. E-mail: by6801@ouc.edu.cn

河流量、水位和盐度等长期观测数据,模拟了不同河流流量下的盐度分布情况,研究了河流流量变化对海水入侵范围及强度的影响机制。HIEN 等^[25-26]结合红河三角洲河流排放调控和海平面上升情景,模拟了未来海水入侵的强度与范围,探讨了不同水资源管理策略和海平面上升情景对海水入侵的影响。在脆弱性研究方面,前人通过构建脆弱性指数(如海水入侵脆弱性指数^[27-28]、海岸脆弱性指数^[29]、生态脆弱性指数^[30]、GALDIT 模型^[31-32]、生计脆弱性指数^[33-34]等)分析灾害对不同承灾体的影响程度。NGUYEN 等^[35]基于海水入侵脆弱性指数,分析了海水入侵对红河三角洲地区社会经济活动和环境的综合影响。NGUYEN 等^[36]、THACH 等^[37]和 YUEN 等^[38]分析了海水入侵对水稻产量的影响,揭示了自然和人为因素对农业生产造成的威胁。TRUC 等^[39]评估了海水入侵对红河三角洲土壤性质的影响。VO 和 TRAN^[40]基于生计脆弱性指数,评估了当地农业对包括海水入侵在内的气候变化威胁的脆弱性。

海水入侵灾害风险由危险性和脆弱性等多因素共同构成^[41-42]。单一要素的研究无法充分反映海水入侵灾害风险的形成机制及影响,难以满足

海水入侵防灾减灾对综合灾害风险评估的需求。目前,红河三角洲海水入侵的综合灾害风险评估研究十分有限,也缺乏对灾害风险评价指标体系与评价方法的系统性研究。鉴于此,本文以红河三角洲沿海地区为例,开展海水入侵灾害风险评价指标体系和灾害风险指数的构建方法研究,综合评估海水入侵灾害风险及空间分布特征,以期海水入侵的防灾减灾提供方法参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红河三角洲位于越南北部、红河流域下游,东临北部湾。红河三角洲位于 19°5′—21°34′N、105°17′—107°7′E,流域面积约为 $3.81 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[43]。红河三角洲地势开阔,水网密布,极易受到气候变化、海平面上升、潮汐和人类活动的多重影响。据统计,红河三角洲每年约有 20%~30% 的农业区面临干旱和海水入侵的威胁^[25]。本文以红河三角洲沿海地区为研究区域,包括 1 个直辖市和 3 个省份:海防市、太平省、南定省和宁平省(图 1)。

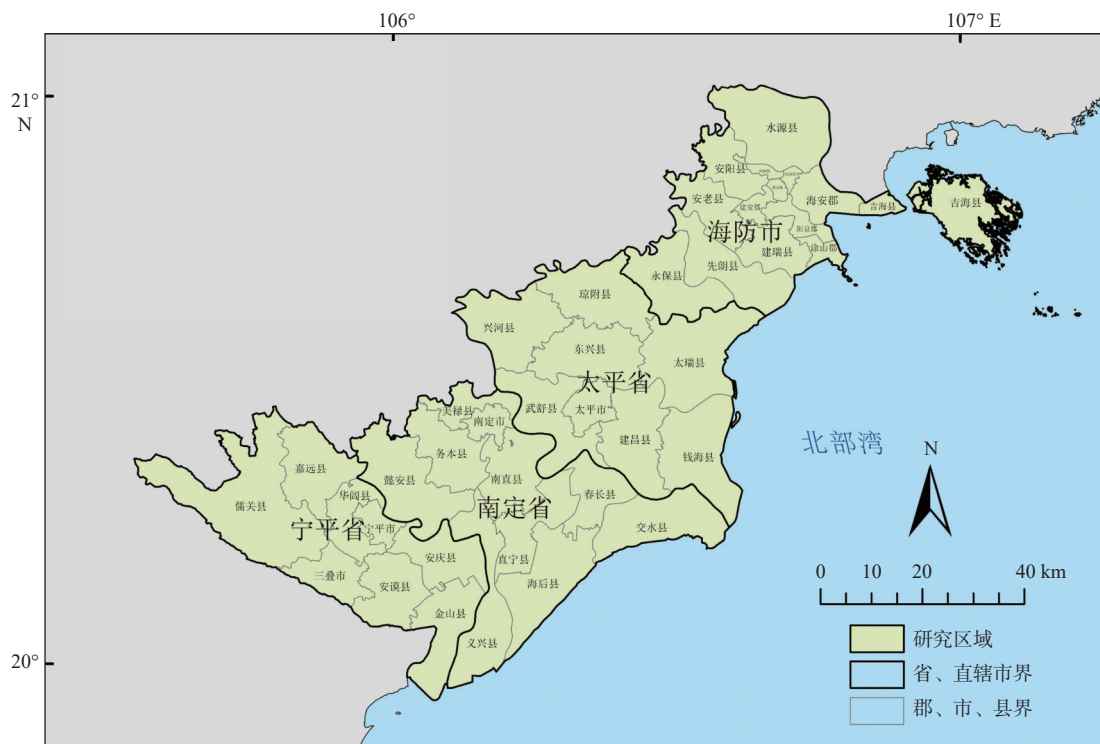


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of the research areas

1.2 评价指标体系的构建及其量化

为全面考察红河三角洲海水入侵灾害风险,参考常用的灾害风险模型^[42, 44-45],本文从危险性、暴露性和脆弱性 3 个角度评估灾害风险。在充分参考前人相关研究^[46-49]的基础上,结合越南红河三角洲海水入侵灾害情况,本研究构建了海水入侵灾害风险评价指标体系(表 1)。各指标权重由专家-层次分析定权法^[50]确定。通过调查问卷收集了 5 位海洋地质领域专家的相对重要性打分,指标最终权重如表 1 所示。

为方便灾害风险计算,本文将各指标划分等级并赋值。划分等级及相应赋值分别为低(1)、较低(2)、中(3)、较高(4)、高(5)。各指标取值等级划分标准及对应赋值如表 2 所示。

1.3 灾害风险评价方法

本文以海水入侵灾害风险指数表征海水入侵灾害风险,灾害风险指数越大表示灾害风险越大,反之亦然。其计算方法如下所示:

$$R = \sqrt[3]{H \times E \times V} \quad (1)$$

式中: R 为海水入侵灾害风险指数;

H 为危险性指数;

E 为暴露性指数;

V 为脆弱性指数。

危险性指数 H 表征海水入侵致灾危险性。危

表 1 越南红河三角洲海水入侵灾害风险评价指标体系

Table 1 The risk assessment indicator system to seawater intrusion disaster for Red River Delta, Vietnam

目标层	准则层	指标层	指标权重
海水入侵灾害 风险(R)	危险性 (H)	H_1 : 海平面上升速率/(mm/a)	0.277
		H_2 : 地下水盐度/(g/L)	0.186
		H_3 : 固溶物总量/(g/L)	0.112
		H_4 : 地下水开采强度/m	0.282
		H_5 : 地面沉降速率/亿越南盾	0.143
	暴露性 (E)	E_1 : 人口密度/(人/km ²)	0.323
		E_2 : 脆弱地类占比/%	0.297
		E_3 : 离岸距离/km	0.380
		V_1 : 农业收入占比/%	0.078
		V_2 : 土地脆弱性水平	0.243
	脆弱性 (V)	V_3 : 海洋科学教育水平/%	0.081
		V_4 : 政府应急救援能力/亿美元	0.322
		V_5 : 城镇化水平/%	0.199
		V_6 : 人均国内生产总值/(美元/人)	0.077

险性指数越大表示致灾的危险性越大,反之亦然。其计算方法为:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \times w_i \quad (2)$$

式中: n 为危险性指标个数;

H_i 为第 i 个危险性指标的赋值;

w_i 为第 i 个危险性指标的权重。

暴露性指数 E 表征承灾体系统的暴露性水平,即可能出现在海水入侵影响范围内的承灾体的数量或价值。暴露性指数越大表示承灾体系统的暴

表 2 评价指标等级划分标准和赋值

Table 2 Criterion for the classification of assessment indicator and assignment

评价指标	指标等级划分及其对应赋值				
	低(1)	较低(2)	中(3)	较高(4)	高(5)
H_1 : 海平面上升速率/(mm/a)	[0, 1)	[1, 2)	[2, 3)	[3, 4)	[4, +∞)
H_2 : 地下水盐度/(g/L)	[0, 5)	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	[20, +∞)
H_3 : 固溶物总量/(g/L)	[0, 3)	[3, 6)	[6, 10)	[10, 15)	[15, 21]
H_4 : 地下水开采强度/m	(0, 0.1]	(-0.1, 0]	(-0.2, -0.1]	(-0.3, -0.2]	[-0.4, -0.3]
H_5 : 地面沉降速率/亿越南盾	[0, 2.5)	[2.5, 5)	[5, 10)	[10, 20)	[20, +∞)
E_1 : 人口密度/(人/km ²)	[0, 100]	(100, 500]	(500, 1 000]	(1 000, 2 000]	(2 000, +∞)
E_2 : 脆弱地类占比/%	[0, 5]	(5, 10]	(10, 20]	(20, 40]	(40, 100]
E_3 : 离岸距离/km	对欧氏距离等间隔分为5级				
V_1 : 农业收入占比/%	[0, 5]	(5, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 100]
V_2 : 土地脆弱性水平	裸露地面	人造地面	林地、草地	水域、湿地	耕地
V_3 : 海洋科学教育水平/%	(5, 100]	(4, 5]	(2.5, 4]	(0.5, 2.5]	[0, 0.5]
V_4 : 政府应急救援能力/亿美元	[70, +∞)	[40, 70)	[20, 40)	[10, 20)	[0, 10)
V_5 : 城镇化水平/%	[0, 15)	[15, 30)	[30, 50)	[50, 70)	[70, 100]
V_6 : 人均国内生产总值/(美元/人)	[0, 1 500]	(1 500, 2 500]	(2 500, 4 500]	(4 500, 5 500]	(5 500, +∞)

露性水平越大, 反之亦然。其计算方法为:

$$E = \sum_{j=1}^m E_j \times w_j \quad (3)$$

式中: m 为暴露性指标个数;

E_j 为第 j 个暴露性指标的赋值;

w_j 为第 j 个暴露性指标的权重。

脆弱性指数 V 表征承灾体系统的脆弱性水平, 即承灾体系统可能遭受海水入侵损害的状态。脆弱性指数越大表示承灾体系统脆弱性水平越高, 反之亦然。其计算方法为:

$$V = \sum_{k=1}^p V_k \times w_k \quad (4)$$

式中: p 为脆弱性指标个数;

V_k 为第 k 个脆弱性指标的赋值;

w_k 为第 k 个脆弱性指标的权重。

对指数计算结果进行归一化处理, 并划分为 5 个等级, 各等级和对应区间范围如表 3 所示。

表 3 指数等级和区间范围

Table 3 The index level and range

等级	低	较低	中	较高	高
区间范围	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]

1.4 数据来源及预处理

本文使用的数据来源及说明如表 4 所示。由于过高的楼房密度是诱发地面沉降的因素之一, 因而地面沉降速率(指标 H_5)由越南各省市的工业与建筑业产值表征。各省工业与建筑业产值引自 2020 年越南统计年鉴^[51]。离岸距离(指标 E_3)由 2017 年红河三角洲海岸线矢量数据计算所得, 并将

原始数据转换为栅格数据。脆弱性指标主要来自 2020 年各类越南统计年鉴。其中, 农业收入占比(指标 V_1)由第一产业收入和地区 GDP 总值的比值计算所得。海洋科学教育水平(指标 V_3)由教育投入和地区 GDP 总值的比值计算所得。城镇化水平(指标 V_5)由城市平均人口数和省市总人口数的比值计算所得。由于统计年鉴获得的数据为点数据, 本研究以该数据值表征各省市全境的水平。

2 结果与讨论

2.1 评价指标分析

2.1.1 危险性指标分析

海水入侵危险性指标的空间分布如图 2 所示。红河三角洲沿海 4 省市海平面上升速率由三角洲平均海平面上升速率计算所得, 处于中等危险性水平。从空间分布来看, 各区域海平面上升速率差异不大; 各省市地下水盐度呈现由海岸向内陆逐渐递减的特征, 其中, 高危险性区域主要位于沿海及河流入海口处。固溶物总量主要集中在太平省和南定省交界处的红河入海口区域, 因而, 此处的固溶物总量较高。地下水开采强度处于中等及以下水平, 位于河流上游的内陆地区地下水开采强度普遍高于沿海地区。其中, 海防市北部地区(水源县北部)具有较高的地下水开采强度。地面沉降速率整体维持在较高及以下危险性水平, 其中, 太平省和南定省的地面沉降速率相对较大。本文采用工业与建筑业产值表征地面沉降速率, 因此, 该结果与太平省和南定省具有较高的工业与建筑业产值有关。

表 4 数据名称及来源说明

Table 4 The data sources and specifications

数据名称	数据说明
海平面上升速率	2021 年红河三角洲海平面高度变化卫星遥感数据分析所得, AVISO 卫星高度计资料 (https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html), 分辨率为 0.25°
地下水盐度	NGUYEN 等 ^[52]
固溶物总量	同越南科学技术翰林院交流获得
地下水开采强度	DUONG 等 ^[53]
工业与建筑业产值	2020 年越南统计年鉴 (https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2021/07/statistical-yearbook-of-2020/)
人口密度	2020 年 Worldpop 全球人口密度栅格数据 (https://www.worldpop.org/geodata/), 分辨率为 1 km
脆弱地类占比、土地脆弱性水平	国家基础地理信息中心的 2020 年全球 30 m 地表覆盖产品 (http://globallandcover.com/), 分辨率为 30 m
离岸距离	由 2017 年红河三角洲海岸线矢量数据计算所得
第一产业收入、地区 GDP 总值、教育投入、地区 GDP 总值、政府财政收入、城市平均人口数、省市总人口数、人均 GDP	2020 年越南统计年鉴、2020 年海防市、太平省、南定省和宁平省统计年鉴 (由越南科学技术翰林院提供数据)

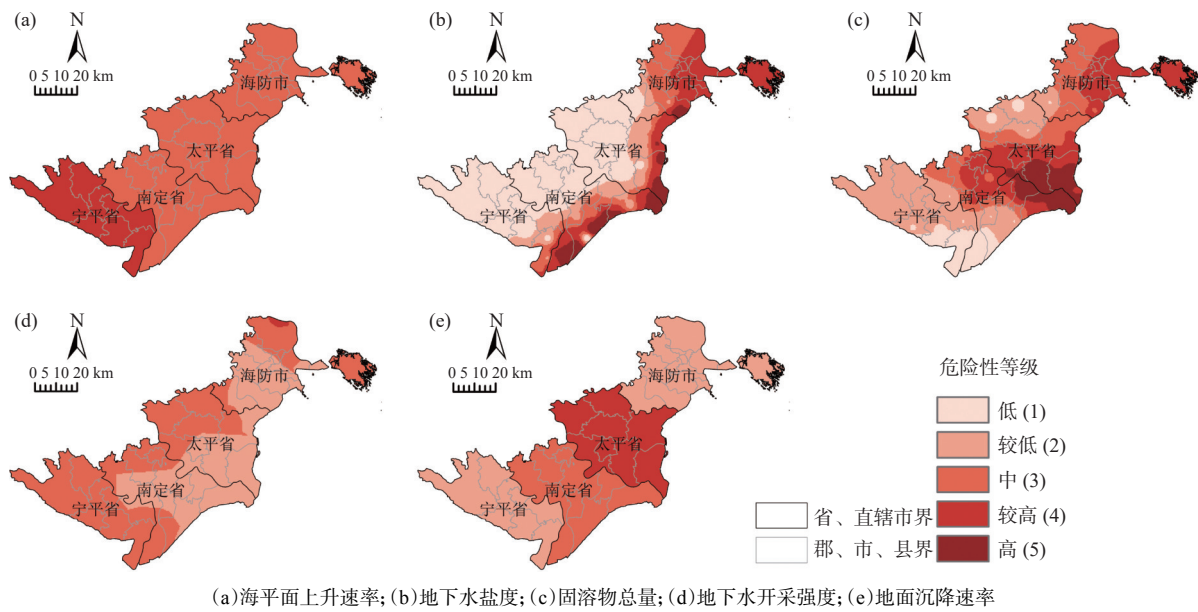


图2 危险性指标空间分布

Fig.2 Spatial distribution of hazard indicators

2.1.2 暴露性指标分析

研究区海水入侵承灾体暴露性指标的空间分布如图3所示。人口密度较高区域主要集中在海防市东北部的黎真郡和鸿庞郡、太平省西南部的太平市、南定省北部的南定市、宁平省中北部的宁平市和金山县等地区。整体来看,各省市的土地脆弱

性均较高。宁平省和南定省的脆弱地类占比高于太平省和海防市,其中,宁平省>80%,南定省>90%。研究区农业用地面积占比较高,使得整体的土地脆弱性较高。在离岸距离方面,暴露性随着离岸距离增加而减小。因此,在制定应对海水入侵防灾减灾策略时,应优先考虑这些易受影响的区域。

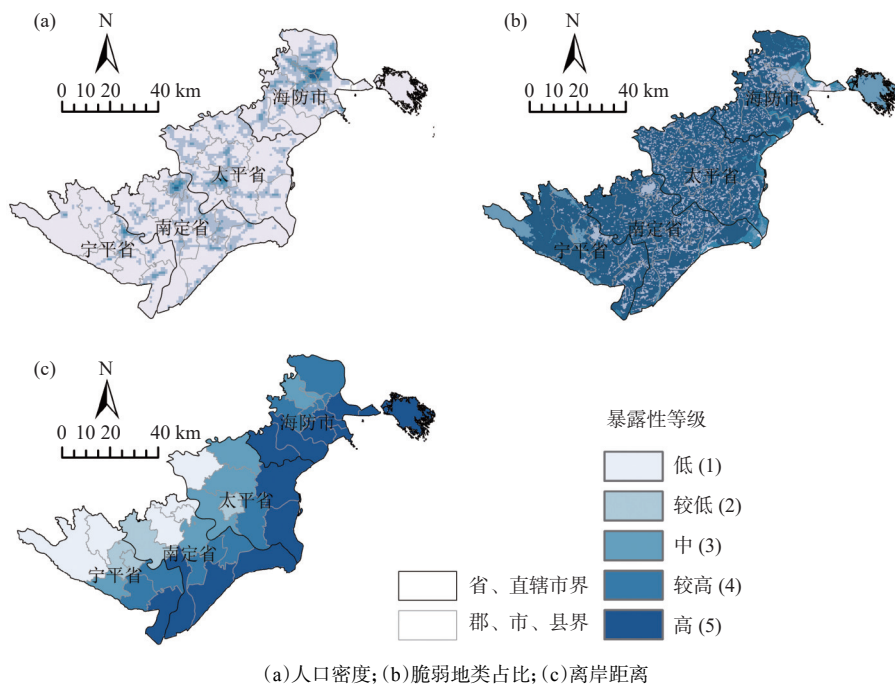


图3 暴露性指标空间分布

Fig.3 Spatial distribution of exposure indicators

2.1.3 脆弱性指标分析

研究区承灾体脆弱性指标的空间分布如图4

所示。宁平省和太平省的农业收入占比相对高于南定省和海防市。从土地脆弱性水平来看,研究区

大部分为农业用地,使得整体脆弱性水平较高。从社会经济层面来看,海防市作为越南第 2 大港口城市和中央直辖市之一,其城镇化水平、海洋科学教

育水平和人均国内生产总值都相对高于其他省市。在政府应急救灾能力方面,太平省和宁平省相对高于南定省和海防市。

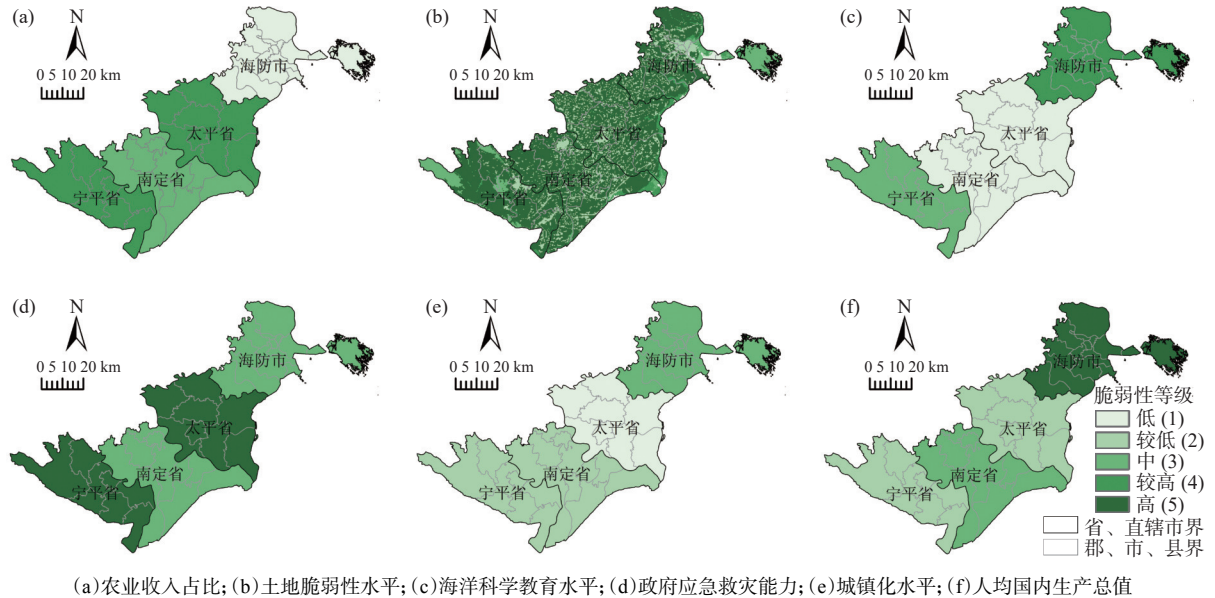


图 4 脆弱性指标空间分布

Fig.4 Spatial distribution of vulnerability indicators

2.2 海水入侵风险评估结果

研究区海水入侵危险性评价结果及空间分布如图 5a 所示。研究区海水入侵危险性指数介于 0.22~0.53, 表明研究区海水入侵总体处于较低—中等危险水平。从空间分布上看, 研究区海水入侵致灾危险性呈东部沿海高、内陆低的空间分布特征。高危险区主要集中在宁平省东南部、海防市东北部以及南定省与太平省交界处的巴拉特河口地区。基于省(市)级的危险性指数平均值, 宁平省和海防市的危险性水平相对高于南定省和太平省。结合指标权重和计算结果分析, 较高海平面上升速率和地下水开采强度是导致以上区域危险性指数较高的主要因素。其中, 宁平省作为红河三角洲主要的农业省份, 农业灌溉对地下水的高需求加剧了地下水的开采压力。与之相比, 海防市的地下水开采需求主要源于其工业化和城市化进程。

研究区海水入侵暴露性评价结果及空间分布如图 5b 所示。研究区的暴露性指数介于 0.20~0.87, 处于较低—高等暴露性水平。从空间分布来看, 东南沿海地区的暴露性高于东北沿海地区, 同时暴露性由沿海向内陆递减。基于省(市)级的暴露性指数平均值, 南定省和海防市的暴露性水平相

对高于宁平省和太平省。海防市的中部区域具有相对更高的暴露性, 与该区域较高的人口密度和高比例的脆弱性地类有关。

研究区海水入侵脆弱性评价结果及空间分布如图 5c 所示。研究区脆弱性指数取值范围为 0.50~0.79, 处于中等—较高脆弱性水平。基于省(市)级的脆弱性指数平均值, 宁平省的整体脆弱性水平高于其他省市。宁平省的高脆弱性与该地区较大面积的农业用地和较高比例的农业收入有关, 表明当地农业系统对海水入侵灾害具有更高的暴露性。由于农业系统依赖于稳定的水资源供给和气候条件, 海水入侵将直接威胁当地的粮食生产和居民生计。

海水入侵灾害风险指数由式(1)计算所得, 其空间分布如图 5d 所示。红河三角洲沿海 4 省市的灾害风险指数取值范围为 0.35~0.67, 处于较低风险—较高风险等级。研究区灾害风险整体呈现东南沿海高、西北内陆低的空间分布格局, 且灾害风险由沿海向内陆逐渐减小。灾害风险的空间分布特征与红河流域的走向(NW—SE 向)^[26] 相关, 进一步表明计算结果的合理性。基于省(市)级的灾害风险指数平均值, 宁平省和南定省的灾害风险相对高于太平省和海防市。其中, 高风险区主要集中

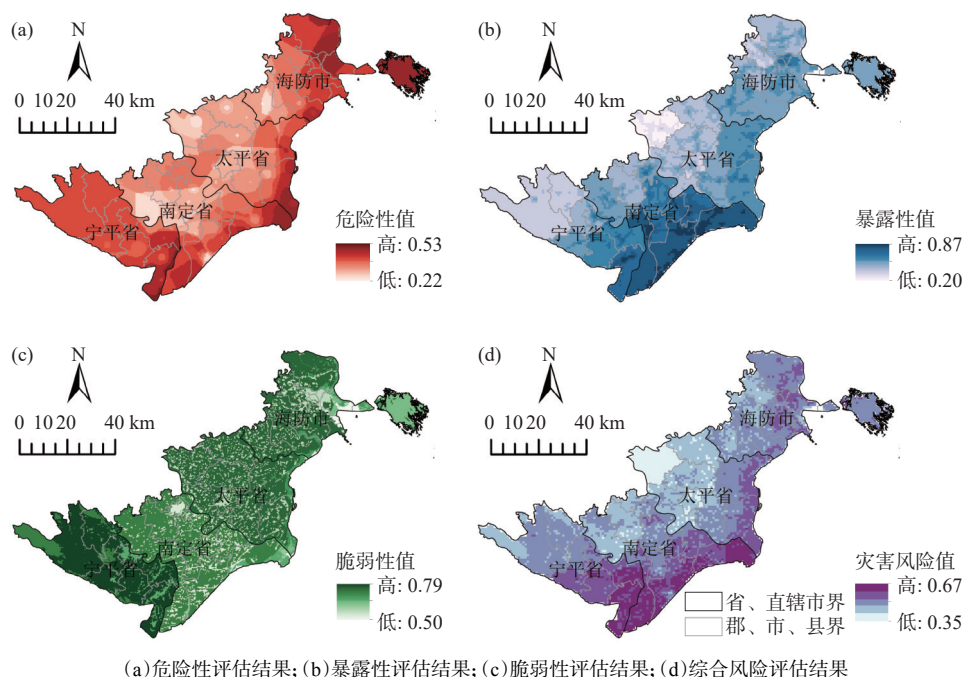


图5 海水入侵灾害风险评估结果

Fig.5 Result of seawater intrusion disaster risk assessment

在红河入海口以南的沿海地区,包括宁平省、南定省东部的沿海地区。

2.3 海水入侵灾害风险管理对策

从防灾减灾的角度,应加强对红河三角洲东部沿海地区海水入侵灾害风险的关注,其中,南定省、宁平省和海防市中部应当予以重点关注,其次是太平省和海防市的东部沿海地区。由于灾害风险由危险性、暴露性和脆弱性三者构成,应当对各省市有针对性的采取措施减轻灾害风险。

越南红河三角洲的海水入侵危险性主要集中在东部沿海地区,包括宁平省和南定省的交界处、南定省和太平省的交界处,海防市北部及东部等区域。地下水开采强度和海平面上升速率对海水入侵危险性贡献最大。因此,应加强对重点区的地下水开采强度和海平面上升情况的预警监测,防止灾情进一步恶化^[54-55]。同时,在河道设施挡潮闸^[56-57]或在土壤表面布设帆布片^[58]可有效阻止海水入侵。对河流上游不合理的地下水开采需要进行管控,可以通过上游蓄水改善由于季节性枯水或过度地下水开采而引起的地下水位剧烈变化等问题^[24],该方法的有效性在 HIEN 等^[26] 研究中得以证明。

高暴露区域主要分布在南定省和宁平省的沿海地区,主要与当地较高比例的脆弱地类占比和人口密度有关。由于越南红河三角洲以农业为主且

具有较高比例的耕地面积,有必要对农业区加强防灾减灾措施。海水入侵灾害高暴露区主要分布在南定省、宁平省和海防市中部地区。同时,在未来城市建设发展中,需要适度控制地区的人口密度,以减小对灾害的暴露性。

宁平省的脆弱性相对其他省市较为突出,应当成为防灾减灾关注的区域。从贡献度上分析,政府应急救援能力和土地脆弱性水平对脆弱性贡献最大。一方面,沿海省市应当继续加强对海水入侵灾害应急救援的投入,不断提高城市对灾害的应对能力。另一方面,由于红河三角洲为重要的水稻产区,可以通过引进更耐盐的种植品种增强对海水入侵的适应力^[59-60]。

3 结论

本文开展了海水入侵灾害风险评价指标体系和灾害风险指数的构建方法研究,综合评估了红河三角洲沿海地区的灾害风险及空间分布特征,主要结论如下:

(1)越南红河三角洲海水入侵灾害风险指数介于 0.35~0.67,处于较低—较高风险等级,并且呈现东南沿海高、西北内陆低的空间分布格局。宁平省东部、南定省东部和海防市中部的地区灾害风险较大,应成为防灾减灾关注的重点区。

(2)越南红河三角洲海水入侵危险性指数介于 0.22~0.53,处于较低—中等危险水平,高危险区主要集中在海防市、太平省和南定省的沿海地区,河口区域需要重点关注。其中,地下水开采和海平面上升对海水入侵危险性贡献较大。研究区暴露性指数介于 0.20~0.87,处于较低—高暴露水平,高暴露区主要集中在南定省和宁平省的东部沿海地区,并且各省市空间差异较大。脆弱性指数介于 0.50~0.79,处于中等—较高脆弱水平,宁平省的脆弱性较为突出,与该地区较高的土地脆弱性有关。

(3)越南红河三角洲海水入侵灾害风险主要受到区域社会经济系统的暴露性和脆弱性影响。因此,需要有针对性地采取防灾减灾措施。海水入侵较严重区域应当加强对海水入侵和海平面上升情况的监测,防止灾情进一步恶化。同时,严格管控河流上游地区、城市人口密集区和重点农业区的地下水开采强度。高暴露区主要受高比例脆弱地类和人口密度影响,而高脆弱性则与较高的土地脆弱性和第一产业占比有关。对于具有较高比例脆弱性地类的区域,可以通过改善种植作物耐盐性、合理规划土地类型等措施减小土地的脆弱性和暴露性。在城市发展建设方面,应当适度管控人口密度,降低人口的暴露性。

(4)虽然本研究为越南红河三角洲海水入侵灾害风险评估提供了参考,但仍存在一定的局限性。研究区的水文、地质和沉积环境等因素会对海水入侵程度产生影响,造成海水入侵风险的空间差异。在未来的研究中,需要将以上因素纳入评价指标,并拓展数据来源及其分辨率,以体现评估结果的空间差异性。

参考文献:

- [1] 刘霜. 海洋环境风险评价和区划方法与应用 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2017.
LIU S. Methods and Applications of Marine Environmental Risk Assessment and Zoning[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2017.
- [2] XIAO H, TANG Y, LI H M, et al. Saltwater intrusion into groundwater systems in the Mekong Delta and links to global change[J]. *Advances in Climate Change Research*. 2021, 12(3): 342-352.
- [3] KAUSHAL S S, LIKENS G E, PACE M L, et al. Freshwater salinization syndrome: from emerging global problem to managing risks[J]. *Biogeochemistry*, 2021, 154: 255-292.
- [4] PANTHI J, PRADHANANG S M, NOLTE A, et al. Saltwater intrusion into coastal aquifers in the contiguous United States: a systematic review of investigation approaches and monitoring networks[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 836: 155641.
- [5] LOC H H, LIXIAN M L, PARK E, et al. How the saline water intrusion has reshaped the agricultural landscape of the Vietnamese Mekong Delta: a review[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 794: 148651.
- [6] ZHU M K, KONG F L, LI Y, et al. Effects of moisture and salinity on soil dissolved organic matter and ecological risk of coastal wetland[J]. *Environmental Research*, 2020, 187: 109659.
- [7] ONDRASEK G, RENGEL Z. Environmental salinization processes: detection, implications and solutions[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 142432.
- [8] KIRWAN M L, GEDAN K B. Sea-level driven land conversion and the formation of ghost forests[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(6): 450-457.
- [9] URY E A, WRIGHT J P, ARDON M, et al. Saltwater intrusion in context: soil factors regulate impacts of salinity on soil carbon cycling[J]. *Biogeochemistry*, 2022, 157(2): 215-226.
- [10] TAROLLI P, LUO J, STRAFFELINI E, et al. Saltwater intrusion and climate change impact on coastal agriculture[J]. *Plos Water*, 2023, 2(4): e0000121.
- [11] BELLAFFIORE D, FERRARIN C, MAICU F, et al. Saltwater intrusion in a Mediterranean delta under a changing climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(2): e2020JC016437.
- [12] ESLAMI S, HOEKSTRA P, MINDERHOUD P S J, et al. Projections of salt intrusion in a mega-delta under climatic and anthropogenic stressors[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 142.
- [13] MUELLER W, ZAMRSKY D, ESSINK G O, et al. Saltwater intrusion and human health risks for coastal populations under 2050 climate scenarios[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 15881.
- [14] TRAN D Q, NGUYEN N N T, HUYNH M V T, et al. Modeling saltwater intrusion risk in the presence of uncertainty[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 908: 168140.
- [15] 越南国家统计局. 2023 年分省面积、人口和人口密度 [EB/OL]. 越南国家统计局, 2023[2024-09-25]. <https://www.gso.gov.vn>.
General Statistics Office of Vietnam. 2023 Area, population and population density by province[EB/OL]. General Statistics Office of Vietnam, 2023[2024-09-25]. <https://www.gso.gov.vn>.
- [16] Vietnamplus. Red River Delta – national economic powerhouse: Official[EB/OL]. (2023-03-31) [2024-09-20]. <https://en.vietnamplus.vn/red-river-delta-national-economic-powerhouse-official-post250801.vnp>.
- [17] ELHAMIDI M J, LARABI A, FAOUZI M. Numerical modeling of saltwater intrusion in the Rmel-Oulad Ogbane coastal aquifer (Larache, Morocco) in the climate change and sea-level rise context (2040)[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2167.
- [18] BLANCO-CORONAS A M, DUQUE C, CALVACHE M L, et al. Temperature distribution in coastal aquifers: insights from

- groundwater modeling and field data[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126912.
- [19] MEMARI S S, BEDEKAR V S, CLEMENT T P. Laboratory and numerical investigation of saltwater intrusion processes in a circular island aquifer[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(2): e2019WR025325.
- [20] LLOPIS-ALBERT C, PULIDO-VELAZQUEZ D. Using MODFLOW code to approach transient hydraulic head with a sharp-interface solution[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(8): 2052-2064.
- [21] NHUNG T T, LE V P, VAN N V, et al. Salt intrusion adaptation measures for sustainable agricultural development under climate change effects: a case of Ca Mau Peninsula, Vietnam[J]. *Climate Risk Management*, 2019, 23: 88-100.
- [22] TRAN D D, THUC P T B, PARK E, et al. Extent of saltwater intrusion and freshwater exploitability in the coastal Vietnamese Mekong Delta assessed by gauging records and numerical simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130655.
- [23] THUY T T T, HUY P K, BANG D D, et al. Assessment the impact of climate change and sea level rise on the unconfined aquifer at the Red-River Delta of Vietnam: a case study at Thai Binh Province[C]//Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining: ISRM 2020-Volume 2, Cham: Springer International Publishing, 2021: 326-348.
- [24] NGUYEN T H, VU M C B, ROBERTO R C. Upstream effects on salinity dynamics in the Red River Delta[C]//APAC 2019: Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts, Hanoi: Springer Singapore, 2020: 1439-1443.
- [25] HIEN N T, YEN N H, BALISTROCCHI M, et al. Salinity dynamics under sea level rise scenarios in the Red-Thai Binh River Delta, Vietnam[C]//YASUYUKI S. Proceedings of the 22nd IAHR-APD Congress, Sapporo: IAHR-APD Congress, 2020.
- [26] HIEN N T, YEN N H, BALISTROCCHI M, et al. Salinity dynamics under different water management plans coupled with sea level rise scenarios in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2023, 51: 67-81.
- [27] PARIZI E, HOSSEINI S M, ATAIE-ASHTIANI B, et al. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: review, development and application[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 555-573.
- [28] MOAZAMNIA M, HASSANZADEH Y, NADIRI A A, et al. Vulnerability indexing to saltwater intrusion from models at two levels using artificial intelligence multiple model (AIMM)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109871.
- [29] BUI Q D, LUU C, HA H, et al. A holistic approach to salinity intrusion vulnerability assessment using geospatial technologies: an application for Mekong Delta of Vietnam[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 113: 104854.
- [30] MIRZAVAND M, GHASEMIEH H, SADATINEJAD S J, et al. Saltwater intrusion vulnerability assessment using AHP-GALDIT model in Kashan plain aquifer as critical aquifer in a semi-arid region[J]. *Desert*, 2018, 23(2): 255-264.
- [31] BOUFEKANE A, MAIZI D, MADENE E, et al. Hybridization of GALDIT method to assess actual and future coastal vulnerability to seawater intrusion[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115580.
- [32] BUSICO G, BUFFARDI C, NTONA M M, et al. Actual and forecasted vulnerability assessment to seawater intrusion via GALDIT-SUSI in the Volturno River Mouth (Italy)[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3632.
- [33] TRAN D D, NGUYEN T D, PARK E, et al. Rural out-migration and the livelihood vulnerability under the intensifying drought and salinity intrusion impacts in the Mekong Delta[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 93: 103762.
- [34] ISHIDAIRA H, NGUYEN K P. Exploring the utility of the entropy method for classifying household livelihood vulnerability and adaptation strategies to salinity intrusion impact-empirical evidence in coastal communities of the Vietnamese Mekong Delta[J]. *Environmental Development*, 2023, 47: 100912.
- [35] NGUYEN V D, VU T T, NGUYEN M D. Development the criteria for saline intrusion vulnerability assessment and application for downstream of Red-Thai Binh River Basin, Vietnam[C]//APAC 2019: Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts, Hanoi: Springer Singapore, 2020: 1335-1342.
- [36] NGUYEN M T, RENAUD F G, SEBESVARI Z, et al. Resilience of agricultural systems facing increased salinity intrusion in deltaic coastal areas of Vietnam[J]. *Ecology and Society*, 2019, 24(4): 19.
- [37] THACH K S R, LEE J Y, HA M T, et al. Effect of saline intrusion on rice production in the Mekong River Delta[J]. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20367.
- [38] YUEN K W, HANH T T, QUYNH V D, et al. Interacting effects of land-use change and natural hazards on rice agriculture in the Mekong and Red River deltas in Vietnam[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21(5): 1473-1493.
- [39] TRUC N N, MIHOVA L, MUKUNOKI T, et al. Effect of saline intrusion on the properties of cohesive soils in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(1): 23-39.
- [40] VO T A N, TRAN T K. Climate change and rural vulnerability in Vietnam: an analysis of livelihood vulnerability index[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2022, 28(3/4): 326-353.
- [41] WANG J J, HE Z C, WENG W G. A review of the research into the relations between hazards in multi-hazard risk analysis[J]. *Natural Hazards*, 2020, 104(3): 2003-2026.
- [42] LIU Y, CHEN J. Future global socioeconomic risk to droughts based on estimates of hazard, exposure, and vulnerability in a changing climate[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 751: 142159.
- [43] 时培兵, 褚庆忠, 陈小哲, 等. 红河三角洲沉积相及其形成模

- 式研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版). 2016, 18(2): 18-21.
- SHI P B, CHU Q Z, CHEN X Z, et al. Sedimentary facies and formation model of Honghe River Delta[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition). 2016, 18(2): 18-21.
- [44] UNISDR. Global assessment report on disaster risk reduction 2013: from shared risk to shared value: the business case for disaster risk reduction[R/OL]. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2013[2024-10-03]. https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2013/en/home/GAR_2013/GAR_2013_2.html.
- [45] DE BONO A, MORA M G. A global exposure model for disaster risk assessment[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 10: 442-451.
- [46] 赵锐锐, 成建梅, 刘军, 等. 基于 GIS 的海水入侵危险性评价方法: 以深圳市宝安区为例[J]. 地质科技情报. 2009, 28(5): 96-100.
- ZHAO R R, CHENG J M, LIU J, et al. Risk evaluation for seawater intrusion based on GIS: a case study in the Bao'an district of Shenzhen City[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(5): 96-100.
- [47] PHIN T T, HOA D T B, TRONG T D, et al. Mapping vulnerability water supply in Rach Gia City due to saline intrusion on using analytical hierarchy process[J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2022, 8(5): 137.
- [48] 束龙仓, 黄蕾, 陈华伟, 等. 基于 AHP-EWM 的莱州市海岸带海水入侵灾害风险评价与区划[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1864-1879.
- SHU L C, HUANG L, CHEN H W, et al. Risk assessment and zoning of seawater intrusion hazard in coastal region of Laizhou City based on AHP-EWM method[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(6): 1864-1879.
- [49] PHAM N Q, TA T T, TRAN L T, et al. Assessment of seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers in context of climate change and sea level rise in the central coastal plains, Vietnam[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, 26(8): 20711-20735.
- [50] 陈晓辉, 李日辉, 温珍河, 等. 渤海海域地质环境稳定性定量评价[J]. 海洋地质前沿. 2024, 40(3): 14-21.
- CHEN X H, LI R H, WEN Z H, et al. Quantitative evaluation of the geological environment stability in the Bohai Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(3): 14-21.
- [51] 越南统计局. 2020 统计年鉴 [EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2021/07/statistical-yearbook-of-2020/>.
- General Statistics Office of Vietnam. Statistical Yearbook of 2020[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.gso.gov.vn/en/data-and-statistics/2021/07/statistical-yearbook-of-2020/>.
- [52] NGUYEN M T, RENAUD F G, SEBESVARI Z. Drivers of change and adaptation pathways of agricultural systems facing increased salinity intrusion in coastal areas of the Mekong and Red River deltas in Vietnam[J]. *Environmental Science & Policy*, 2019, 92: 331-348.
- [53] BUI D, KAWAMURA A, TONG T, et al. Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(8): 1635-1650.
- [54] TRAN T A, DANG T D, NGUYEN T H. Moving towards sustainable coastal adaptation: analysis of hydrological drivers of saltwater intrusion in the Vietnamese Mekong Delta[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 770: 145125.
- [55] NGUYEN V H, DUONG V T, LE A, et al. Machine learning-based early-warning systems for salinity intrusion in the Mekong River Delta, Vietnam[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2024, 29(5): 04024032.
- [56] CHEN Z, ORTON P M. Effects of storm surge barrier closures on estuary saltwater intrusion and stratification[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(3): e2022WR032317.
- [57] TRAN T A, COOK B R. Water retention for agricultural resilience in the Vietnamese Mekong Delta: towards integrated 'grey - green' solutions[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2024, 40(3): 532-553.
- [58] TRAN T A, NGUYEN T H, VO T T. Adaptation to flood and salinity environments in the Vietnamese Mekong Delta: empirical analysis of farmer-led innovations[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 89-97.
- [59] MORTON L W. Working toward sustainable agricultural intensification in the Red River Delta of Vietnam[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(5): 109-116.
- [60] LUYEN P, KAMOSHITA A. On-farm agronomic manipulations to improve rice (*Oryza sativa* L.) production in the saline coastal zone of the Red River Delta in Vietnam[J]. *Plant Production Science*, 2023, 26(3): 209-224.

Risk assessment of seawater intrusion in the Red River Delta of Vietnam

XIE Xiaoru^{1,2}, LIU Ruonan³, WANG Guanxun³, YU Jing^{3*}, FAN Yongbin⁴,
ZHANG Kuncheng⁵, WU Shanshan¹, TENG Xin¹

(1 National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2 School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3 College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4 Qingdao Marine Management and Support Center, Qingdao 266000, China; 5 School of Marxism, Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The Red River Delta (RRD) in Vietnam is highly vulnerable to seawater intrusion, on which the disaster risk assessment is essential for effective regional disaster prevention and mitigation. We developed a comprehensive indicator system for assessing seawater intrusion risks by analyzing the disaster risks and their spatial distribution across the provinces of Hai Phong, Thai Binh, Nam Dinh, and Ninh Binh. Results show that: ① The disaster risk levels range from 0.35 to 0.67, reflecting a relatively low to relatively high risk level, with a decreasing trend from the southeastern coastal regions to the northwestern inland areas; ② The hazard indicators range from 0.22 to 0.53, indicating relatively low to moderate level, with high-risk areas concentrated along the coasts of Nam Dinh, Hai Phong, and Thai Binh; ③ The exposure indicators span from 0.20 to 0.87, showing relatively low to high level of exposure, with elevated levels in the eastern coastal regions of Nam Dinh and Ninh Binh; ④ The vulnerability indicators range from 0.50 to 0.79, indicating moderate to relatively high vulnerability, with the highest vulnerability observed in Ninn Binh; ⑤ The risk of seawater intrusion disasters is mainly affected by the exposure and vulnerability of regional socio-economic systems, to which we shall consider the need for region-specific disaster prevention and mitigation measures. This study provided a critical insight for enhancing disaster resilience against seawater intrusion in the RRD.

Key words: seawater intrusion; disaster risk; Red River Delta; risk assessment