

海水入侵—土壤盐渍化灾害链研究初探

徐兴永^{1,2,3}, 付腾飞^{1,2,3}, 熊贵耀⁴, 苏 乔^{1,2,3}, 刘文全^{1,2,3}, 陈广泉^{1,2,3}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部 海洋沉积与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266061;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;
4. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083)

摘 要: 灾害链是在时间上有先后、空间上彼此相依、成因上相互关联, 破坏性极强的呈链式结构的多种灾害。由于灾害链的形成与演化具有叠加、放大和链式效应, 已经成为灾害研究的热点和难点。受全球气候变化和人为因素的双重影响, 海岸带地区成为地球上最活跃、最脆弱的区域。海水入侵和土壤盐渍化成为海岸带地区面临的主要地质灾害, 威胁生态安全和人类生存环境, 这 2 种灾害相继发生、相互关联, 构成海水入侵—土壤盐渍化灾害链。归纳总结了灾害链研究进展, 阐述了海水入侵—土壤盐渍化灾害链的演化特征和研究中的关键科学问题, 展望了海水入侵—土壤盐渍化灾害链研究趋势。

关键词: 灾害链; 地质灾害; 海水入侵; 土壤盐渍化; 灾害防治

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)01-0001-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.001

引用格式: XU X Y, FU T F, XIONG G Y, et al. Progress and prospect of the research on seawater intrusion to soil salinization disaster chain[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 1-10. 徐兴永, 付腾飞, 熊贵耀, 等. 海水入侵—土壤盐渍化灾害链研究初探[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 1-10.

近年来, 全球气候变化异常加剧, 社会经济快速发展, 各类灾害活动频发, 严重影响人类生命、财产和生态环境安全。灾害发生发展经常伴随着次生灾害, 这些在时间上有先后、空间上彼此相依、成因上相互关联、互为因果, 呈连锁反应的灾害组成灾害链^[1]。

灾害链的相关研究刚刚兴起, 不同学者对灾害链的概念有多种理解, 对灾害链的研究内容与方法也各不相同^[2]。国外对灾害链研究还处于初步阶段; Dombrowsky 等^[3]认为灾害链是自然与社会系统相互作用的后果; Menoni 等^[4]提出灾害损失链概念; Carpignano 等^[5]认为灾害链是灾害间相互作用而形成的多米诺现象; Helbing^[6]认为灾害之间具有因果关系; Delmonaco 等^[7]认为灾害链是指灾害引发的次生灾害。国内对灾害链的研究范围较广: 如灾害链理论^[2,8-9]、大气灾害链^[10]、山地灾害链^[11]、生态环境灾害链^[12]、自然灾害链^[13]、地质灾害链^[14-18]、海洋灾害链研究^[19]等, 重点研究山区地质灾害链和沿海地区台风灾害链等, 仍处于灾害链研究的初步定性研究阶段^[18]。灾害链发生过程具有放大效应, 致灾强度具有累加效应, 而且灾害链形成机理复杂、预报难度大、防范要求高、造成的损失严重, 因此灾害链发生与治理机制是目前灾害研究的国际前沿问题^[20]。

地质灾害是指在地球的发展演化过程中, 由各种自然地质作用和人类活动所形成的灾害性地质事件。

收稿日期: 2019-02-20

资助项目: 国家自然科学基金委员会联合基金项目——山东海岸带海水入侵—土壤盐渍化灾害链发生与治理机制研究(U1806212); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——基于海水入侵—土壤盐渍化灾害链发生机制的三维电阻率监测技术研究(2019Q01); 国家自然科学基金青年基金项目——海水入侵—土壤盐渍化灾害链的水盐运移机制及电阻率判定研究(41706068); 国家自然科学基金山东海洋科学中心项目——海洋地质过程与环境(U150640007)

作者简介: 徐兴永(1975-), 男, 研究员, 博士, 主要从事海岸带地质与第四纪环境、地质灾害等方面研究。

E-mail: xuxingyong@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

地质灾害在时间和空间上的分布变化规律,既受制于自然环境,又与人类活动有关,经常是人类与自然界相互作用的结果^[21]。由成因上相互关联,时间上有先后顺序,空间上彼此相依,并呈线性分布的一系列地质灾害体组成,呈连锁反应依次出现的链式地质灾害被称之为地质灾害链^[14]。

全球 60% 的大城市和 60%~70% 的人口分布在海岸带及紧邻地区。受全球气候变化和人为因素(地下水超采等)的双重影响,海岸带地区成为地球上最活跃、最脆弱的区域。根据《2017 年中国海平面公报》^[22],2017 年中国沿海气温较常年均值高 0.90 °C,海平面较常年平均值高 58 mm,高于全球平均水平。近年,海岸带环境问题突出,灾害加剧,严重影响海岸带地区的可持续发展。气候变化和人类活动引起海岸带地下水动力变化,并诱发一系列链式地质灾害^[23-24],海水入侵、土壤盐渍化灾害等是典型的地质灾害链。海水入侵—土壤盐渍化链式灾害的实质是受外界因素影响,咸淡水楔形体运移,盐分在水土系统中迁移,导致地下水咸化,然后盐分在毛细作用及蒸发作用下向表层迁移形成土壤盐渍化,导致土壤功能退化^[25-26]。目前,国内外对海水入侵研究较多,滨海地区土壤盐渍化也逐渐引起国内外研究者广泛关注,但主要开展单灾种研究与防治,忽略了海水入侵—土壤盐渍化灾害链的整体性,关于海水入侵—土壤盐渍化灾害链的研究鲜有报道。

海岸带地区在国家战略布局中占有极为重要的地位,海岸带的生态脆弱性及其复杂性致使该区域环境对全球气候变化和人类活动的响应十分迅速,但我国在海岸带地质灾害研究方面,尤其是针对多灾种的链式灾害研究非常少,不能满足海岸带资源开发利用和环境保护的急迫需求。本文以我国典型海岸带地区海水入侵—土壤盐渍化灾害链为研究对象,阐述了海水入侵—土壤盐渍化灾害链的发育特征和研究中的关键科学问题,展望了海水入侵—土壤盐渍化灾害链研究趋势,旨在丰富海岸带地质灾害理论,为海岸带防灾减灾和可持续发展提供科学参考。

1 演化特征

1.1 海水入侵灾害和土壤盐渍化灾害特征

海水入侵灾害是指在自然和人为因素影响下,海滨地区水动力条件发生变化,使海滨地区含水层中的淡水与海水(咸水)之间的平衡状态遭到破坏,导致海水或咸水沿含水层向陆地方向侵入或混染,使淡水资源遭到破坏的现象或过程。海水入侵是人为活动强烈干扰自然生态系统而诱发的缓慢发生而又长期危害的人为自然灾害,具有隐蔽、多变、难治理的特点。目前,全世界已经有几十个国家和地区的几百个地方发现了海水入侵问题,海水入侵给各国沿海地区带来严重危害,造成巨大经济损失,严重阻碍社会经济的持续发展。海水入侵严重污染地下水,造成工业产品质量下降、生产设备腐蚀,人畜饮用水咸化,并导致多种疾病,影响健康。

土壤盐渍化灾害指在自然和人为因素影响下,土壤或潜水层中的盐分在毛管及蒸发作用下,在土壤向表层迁移富集形成的灾害现象。盐渍化的形成是一个复杂的过程,目前对土壤盐渍化影响因素的研究包括降水^[27]、蒸发^[28-29]、地形与土地覆被^[30-31]、地下水^[32-33]等。其中,地下水是盐分运移、聚集、交换的主要驱动力^[34],盐渍化程度与地下水位、地下水的盐度有密切联系^[35-37],也与土壤质地、水力特性、水文地质、地球化学条件等有关^[38]。土壤盐渍化灾害危害严重,造成土壤含盐量增高,抑制植物生长;土壤通透性、孔隙度、导水率等物理特性变差;植物发生生理干旱,农作物减产或绝收;土壤富集重金属,毒害严重。

海岸带地区的海水入侵会导致地下水咸化,进而诱发土壤盐渍化。因此,海水入侵和土壤盐渍化两种地质灾害在时间上有先后、空间上彼此相依、成因上相互关联,海水入侵—土壤盐渍化属于典型的链式结构灾害。

1.2 海水入侵—土壤盐渍化灾害链链式结构

灾害链复杂多样,灾害链分类对于深入了解灾害链的形成机制、时空演变规律及其断链减灾对策具有重要意义。由于不同研究者对灾害链的认识与理解不同,各学者对于灾害链的分类方法也有差异。韩金良

等^[14]按照时空和主要诱发因素划分地质灾害链类型,提出时空链是指由一系列在时间上有先后,在空间上彼此相依,在成因上相互联系、互为因果,呈连锁反应依次出现的几种灾害组成的灾害链。其特点是前一种灾害作为后一种灾害的激发因素依次出现。按照诱发因素,把地质灾害链分为内动力地质灾害链、外动力地质灾害链、人类工程活动地质灾害链、内外地质作用耦合地质灾害链和复合型地质灾害链。哈斯等^[2]归纳总结灾害链分为3类:基于灾种的灾害链分类、基于时空结构的灾害链分类、基于灾害系统要素的灾害链分类。

以莱州湾为例,受全球气候变化(降雨、蒸发、海平面上升等)和人类活动(超采地下水,不合理开发地下卤水、引水灌溉等)外界因素影响,咸淡水楔形体运移,盐分在水土系统中迁移,导致地下水咸化,发生海水入侵灾害,严重污染地下水,造成工业产品质量下降、生产设备腐蚀,人畜饮用水咸化,导致多种疾病,影响健康;然后盐分在毛细作用及蒸发作用下向表层迁移富集,形成土壤盐渍化。土壤盐渍化灾害危害严重,造成土壤含盐量增高,抑制植物生长;土壤通透性、孔隙度、导水率等物理特性变差;植物发生生理干旱,农作物减产或绝收;土壤富集重金属,毒害严重。综合分析海水入侵与土壤盐渍化之间的灾变关系和时空分布特征,海水入侵—土壤盐渍化灾害链属于典型的时空灾害链,是由自然因素和人类活动联合作用诱发的复合型地质灾害链(图1)。

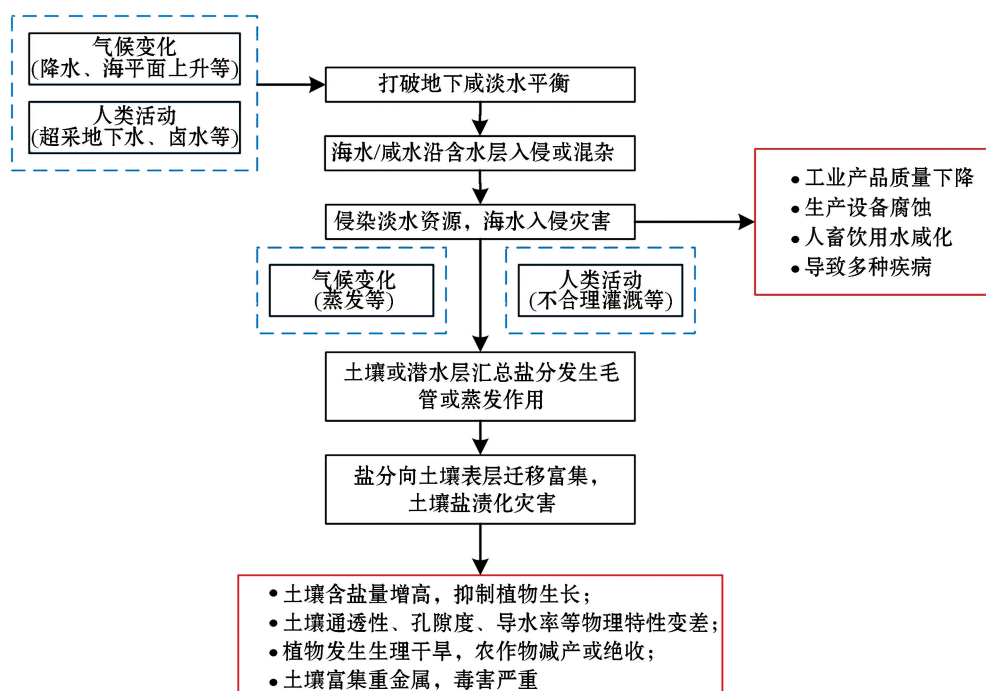


图1 海水入侵—土壤盐渍化灾害链式结构

Fig.1 Structure of seawater intrusion and soil salinization disaster chain

2 关键科学问题

海水入侵—土壤盐渍化灾害链是以水盐运移为链条的链式灾害,掌握链式灾害总盐分实时动态变化过程,提高定量评估链式灾害的精细化程度,清晰刻画灾害链结构特征,实现灾害链的精准断链减灾是研究海水入侵—土壤盐渍化灾害链的关键科学问题。

2.1 掌握链式灾害的实时动态变化过程

海水入侵—土壤盐渍化链式灾害实质为盐分在水土系统中的迁移和富集,了解地下咸淡水混合和水盐

运移动态变化过程,是掌握链式灾害实时动态变化过程的关键。在海水入侵与土壤盐渍化灾害的相关性研究中,研究者大多探讨海水入侵导致地下水咸化后,利用微咸水灌溉导致次生盐渍化的过程。Daliakopoulos 等^[39]利用数值模拟软件模拟了滨海地区在气候变化的影响下海水入侵导致地下水咸化,采用微咸水灌溉又致使土壤盐渍化的过程。Russak 和 Sivan^[40]利用土柱试验、田间试验结合数值模拟研究了海水入侵后含水层发生盐渍化的过程。Mehnert 和 Jennings^[41]通过地下水盐度,研究了盐度对于土壤渗透性的作用。有学者研究了海水入侵与盐渍化的空间分布相关性^[42-43]。在海水入侵和土壤盐渍化的相关性研究中,发现地下水在盐分的迁移、聚集和交换过程中起着至关重要的作用^[44],地下水位水质的变化将导致一系列严重的环境问题,如农作物减产、土地盐渍化等^[45-48]。研究发现,水分迁移主要受温度、土壤初始含水量、含盐量、土壤结构等因素的影响^[49],水迁移的微观机制包括氢键吸附能力、饱和蒸汽压差和毛细管机制^[50]。

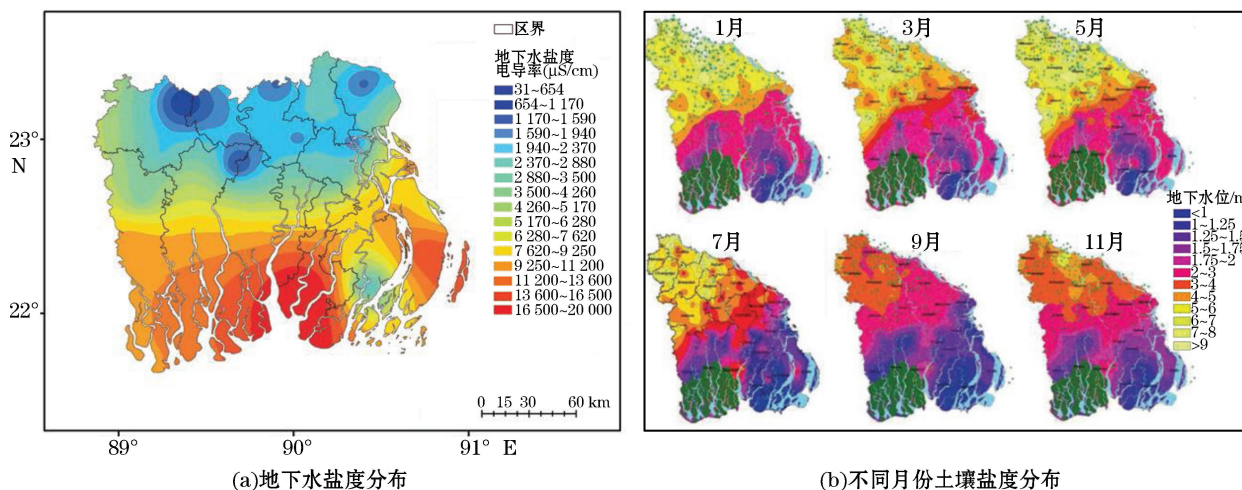


图2 孟加拉海岸带海水入侵与土壤盐渍化分布相关性^[42]

Fig.2 The correlation between seawater intrusion and soil salinization in coastal zone of Bangladesh

滨海地下水的咸化过程一直是国际研究的热点。研究表明,除海平面上升因素之外,海平面周期性变化,如潮汐、波浪等同样会影响海水入侵的驱动及咸淡水界面之间海水与地下水之间的循环模式^[51-52]。潮汐或波浪会导致咸淡水混合区域盐度稳态被打破,使得盐分重新分布以达到一个平衡状态^[53]。Najib 等^[54]利用摩洛哥地下水样品和高密度电法研究了海水入侵导致地下水咸化并向内陆侵染的过程;Badaruddin 等^[55]利用物理和数值模拟,模拟了非潮汐情况下海水入侵导致地下水咸化的过程。而在非饱和和包气带区域,土壤底层或地下水中的盐分在毛细作用及蒸发作用下随毛管水上升到地表,当地下水位和地下水的盐度达到一定的阈值时,盐分积累在表层土壤中,形成盐渍化灾害^[56],而阈值主要取决于土壤质地及其水力特性、水文地质和地球化学条件以及作物类型^[57]。由于滨海地区大多地势平坦、地下水位埋深较浅,加之海岸带区域过度抽水、蒸发量较大,致使导致咸淡水混合区域盐度稳态被打破,使得盐分重新分布以达到一个平衡状态,衍生次生灾害—土壤盐渍化,形成海水入侵—土壤盐渍化灾害链^[58]。

目前,国内外对海水入侵-土壤盐渍化灾害链的水盐运移研究鲜有报道^[59-60]。因此,采用多学科、多领域交叉融合方法,掌握地下咸淡水混合和水盐运移动态变化过程,搞清潜水层咸淡水混合机制,包气带水盐运移规律,灾害链触发条件、发生和发展过程,是研究海水入侵—土壤盐渍化灾害链的关键科学问题之一。

2.2 提高定量评估模拟链式灾害的精细化程度

海岸带是水圈、岩石圈、大气圈和生物圈相互作用的交汇地带,物质和能量通过陆-海、海-气、陆-气等关键界面进行交换,由气候变化和人类活动造成的全球变化对海岸带的影响主要表现为气温升高、海平面上升、极端降雨等造成的海水入侵、海岸侵蚀和生态系统损害等各方面^[61]。海水入侵本质为海岸带咸淡水界

面在地下水位的变化下水动力平衡被破坏,导致这一现象的主要原因是气候变化、海平面上升和人为超采地下水等。通过评估气候变化(潮汐、海平面上升等)和人类活动(地下水开采、地下卤水开采、农业灌溉等)对灾害链影响,可以定量辨识气候变化和区域人类活动对海水入侵和土壤盐渍化的响应机制,预测海平面上升不同情境下海水淹没范围的空间分布,评估海平面上升不同情境下灾害链强度、持续时间,评估风暴潮等极端气候事件对灾害链影响。同时,也可以根据海水入侵受潮汐作用影响的内在规律,建立地下水受海平面变化影响模型,分析海平面变化对海水入侵的影响因素;根据长期气候波动数据(降雨、蒸发、径流量以及 ENSO 等),结合水槽试验进行数值模拟,评估降雨量和蒸发量等气候因素对海水入侵—土壤盐渍化灾害链的影响;根据地下水开采和农业灌溉等数据,分析区域人类活动对海水入侵与土壤盐渍化的影响,定量辨识气候变化和区域人类活动对海水入侵与土壤盐渍化灾害链的影响。

因此,通过多种技术方法,获取覆盖面更广、时效性更强、精度更高的监测数据和关键信息,采取有效的科学方法定量辨识自然因素和人为因素等致灾因子对灾害链的影响,提高定量评估和模拟预测链式灾害的精细化程度,可为研究海水入侵—土壤盐渍化灾害链结构特征和防灾减灾提供关键依据,也是海水入侵—土壤盐渍化灾害链的关键科学问题。

2.3 长期气候变化对海水入侵—土壤盐渍化灾害链影响预测

当前,研究海平面上升对海水入侵的影响,都假设海平面是一种瞬时变化,而非实际的逐渐、缓慢过程,这种简化处理导致评估的海水入侵速率比实际快^[58]。多数相关研究还忽略了陆地淹没面积的影响,而陆地淹没是海平面变化对地下水影响的一个重要控制因素^[62-63]。

滨海平原区高程普遍较低,海平面加速上升,使海岸带地区更容易被海水淹没^[64],进而加剧土壤盐渍化灾害。研究表明,当出现百年一遇极端水位时,2080 年整个中国沿岸的可能淹没面积为 $104.943\ 7\times 10^3\text{ km}^2$ ^[65]。随海平面上升幅度增加,到 2100 年仅山东北部沿海地区遭遇百年一遇风暴潮淹没范围将比 2000 年增加 $581.2\sim 807.5\text{ km}^2$,向陆推进距离最远超过 810 m ^[66]。在大多数数值模拟研究中,通常假设含水层是水平的,而实际情况中,绝大多数海岸带含水层都有一定坡度^[58]。三维数值模拟研究表明,含水层坡度对海水入侵的影响要远大于含水层厚度和弥散速率,含水层坡度是控制海平面变化对海水入侵影响程度量级的重要因素,在含水层坡度为 1% 时,陆地淹没要比海平面垂直方向上升导致的海水入侵程度大一个数量级^[62,67]。

近年,涉及气候变化和水文地质条件对海水入侵及其陆地淹没影响的研究正在逐渐增多。但这些研究对不同因素在海水入侵中所起作用的重要程度也没有达成共识。因此,综合考虑前人相关研究,建立一个包含所有影响因素的海平面上升对地下水的影响评估模型是本领域的最大挑战^[68]。海平面上升对地下水影响的研究应包括咸淡水过渡带、空间维度、地下水开采、含水层的输入输出、海浪与潮汐,以及其诱发的次生灾害相关研究内容^[62]。本问题更深入的研究还需要以海平面上升驱动海岸带水土系统水盐运移机制为基础^[69]。

因此预测海平面上升不同情景下的海水淹没范围的空间分析;结合水槽试验建立数值模型,评估海平面上升不同情景下的海水入侵与土壤盐渍化的强度、持续的时间与灾害链的演化机制;根据风暴潮等极端气候事件进行验证,完善不同类型海岸带海水入侵与土壤盐渍化灾害链对长期气候变化的响应机制模型,开展海水入侵—土壤盐渍化灾害链长期预测是滨海地区防灾减灾的必然趋势。

2.4 清晰刻画灾害链结构特征,实现精准断链减灾

灾害链的防治是当今灾害学研究的世界性难题,要把链式灾害作为整体开展研究,形成灾害链的协同防治技术方案。很多研究学者在灾害链的治理过程中提出孕源断链减灾,在灾害链形成初期利用工程措施、生物措施等手段阻止灾害发生,达到切断灾害链的目的。当前的研究多集中于地震、滑坡等灾害链,并已在地震前兆和预测等方面取得了一定的成果^[70-71]。但在其他灾害链类型上研究较少,且灾害链断链减灾研究中

缺乏断链过程研究以及断链减灾技术之间的有机结合,未能实现减灾措施的相互协调。

海水入侵—土壤盐渍化链式灾害具有独特的发生机制及链结特点,对于此类链式灾害的预防与治理需要进行系统完善的治理机制的研究,应当瞄准海水入侵—土壤盐渍化灾害链的机理和演变过程,抓住灾害链的关键过程,寻踪“链结”之所在,弄清阻断或减轻后续灾害的可能性,进而在海水入侵—土壤盐渍化灾害链的不同链结处采取不同的断链减灾手段。因此,要在明晰海水入侵—土壤盐渍化灾害链发生机制,定量辨识自然因素和人为因素对灾害链影响的基础上,清晰刻画灾害链结构特征,优选精准断链减灾技术,制定灾害链协同防治方案。例如,在海水入侵导致地下水咸化的过程中,可在入侵通道处构建盐敏感性材料的选择性渗透坝,将海水与地下水之间的盐分联系切断,或者利用深井抽水与注水的方式建立地下水水力屏障阻碍海水向内陆的侵染;在地下水盐分向土壤表层集聚的过程中,则依据水盐阻隔疏导的原则,利用深耕、微咸水灌溉等手段减轻盐分在土壤中积累的程度;在滨海盐渍土修复、改良的过程中,可构建耐盐微生物和耐盐植物的复合群落进行生物协同修复,以改善土壤环境,降低土壤盐分,构建耐盐群落生态系统。通过对各种断链减灾手段及治理效果进行综合评估,制定出系统、协同的有效治理方案,实现海水入侵—土壤盐渍化灾害链的防治。当然防灾重于治灾,减轻灾害链的危害效应,首先要做好防灾工作。灾害发生后措施再完备,缺乏灾前预防,仍是失策。因此,若要防止海水入侵—土壤盐渍化灾害链发生,仍需从控制地下水过量开采、有效应对气候变化着手,积极采取相关管理手段和应对措施。

3 研究展望

海水入侵和土壤盐渍化已成为我国海岸带地区近 40 a 来比较突出的环境地质灾害,其中以山东最为突出,河北、辽宁、江苏、天津、上海、广东等省市均有发生,危害身体健康和工农业生产,生态系统功能退化,严重制约了沿海地区经济发展。根据《2017 年中国海洋灾害公报》^[72],2017 年我国各类海洋灾害共造成直接经济损失 63.98 亿元,环渤海地区海水入侵和土壤盐渍化较为严重,海水入侵面积超过 10 000 km²,土壤盐渍化面积超过 15 000 km²。其中,山东海水入侵面积超过 4 000 km²,土壤盐渍化面积超过 7 000 km²。海水入侵和土壤盐渍化灾害具有形成机理复杂、预报难度大、防范要求高、致灾严重、修复周期长等特点,在海水入侵—土壤盐渍化灾害链孕育规律、形成机制、演化过程的系统研究中,还面临大量的科学难题。未来随着可持续发展与防灾减灾的迫切需求,灾害链研究的基础理论和技术方法、灾害链风险评估技术、灾害链损失评估技术、灾害链断链减灾对策研究等将会得到重视^[2],建议从以下方面开展海水入侵—土壤盐渍化灾害链研究。

3.1 研究思路由静态分阶段向实时动态发展

海水入侵和土壤盐渍化灾害研究由原来的单灾种、分阶段单一评价指标,发展为由水文地质、生态环境、地球化学等多学科和地球物理探测、同位素示踪、3S 技术等多技术应用的综合研究技术体系。海水入侵—土壤盐渍化链式灾害实质为盐分在水土系统中的迁移和富集,掌握地下咸淡水混合和水盐实时运移动态变化过程,是掌握链式灾害演化机制和综合防灾减灾的关键。因此,在海水入侵—土壤盐渍化灾害链的研究思路应由静态分阶段向实时动态发展。

3.2 研究目标由定性描述向精细化定量评估与数值模拟发展

在海水入侵与土壤盐渍化灾害的相关性研究中,开始利用数值模拟软件模拟滨海地区在气候变化和人类活动的影响下海水入侵导致地下水咸化,进而发生土壤盐渍化的过程,并由基于海平面波动、地下水开采、潮汐作用、极端气候事件、岸线变化等单因素定量模拟逐渐向综合评价和模拟模型方向发展。未来随着空间信息技术的发展,卫星遥感、3S 技术将应用于海水入侵—土壤盐渍化链式灾害的动态监测中,并构建区域地质、水文、土地利用和作物生长一体化的灾害监测与定量评估预测模型,利用信息反演提高预测模型的效

率与精度,最终实现区域海水入侵—土壤盐渍化链式灾害预测与防治。

3.3 防治机制由单灾种防治向链式灾害协同防治发展

目前,对海水入侵与土壤盐渍化灾害仅开展单灾种研究与防治,忽略了灾害链的整体性研究和防治。海水入侵—土壤盐渍化灾害链的研究仍处于海水入侵、土壤盐渍化或者水盐运移单一研究的阶段,必须将海水入侵与土壤盐渍化作为一个灾害链整体进行系统研究,考虑不同尺度的自然影响因子与人类活动要素,构建全面的研究体系,进而揭示灾害链发生机理、演化过程及关键节点,清晰刻画海水入侵—土壤盐渍化灾害链结构特征,加强断链减灾技术研究,实施精准断链减灾,实现防治机制由单灾种防治向链式灾害协同防治方向发展。

参考文献(References):

- [1] YIN Y P. Characteristics and preventive measures of chain geological disasters[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017(3): 3. 殷跃平. 链状地质灾害的特征与防范应对[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017(3): 3.
- [2] HA S, ZHANG J Q, TONG S Q, et al. Progress and prospect of the research on disaster chain[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 131-138. 哈斯, 张继权, 佟斯琴, 等. 灾害链研究进展与展望[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 131-138.
- [3] DOMBROWSKY W R. Again and again: is a disaster what we call a 'disaster'[J]. International Journal of Mass Emergencies and Disasters, 1995, 13(3): 241-254.
- [4] MENONI S. Chains of damages and failures in a metropolitan environment: some observations on the Kobe earthquake in 1995[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 86(1): 101-119.
- [5] CARPIGNANO A, GOLIA E, DI MAURO C, et al. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application[J]. Journal of Risk Research, 2009, 12(3): 513-534.
- [6] HELBING D. Globally networked risks and how to respond[J]. Nature, 2013, 497(7447): 51-59.
- [7] DELMONACO G, MARGOTTINI C, SPIZZICHINO D. ARMONIA methodology for multi-risk assessment and the harmonization of different natural risk maps[DB/OL]. Deliverable 3.1.1. ARMONIA.
- [8] GUO Z J, QIN B Y. Brief discussion on disaster physics[J]. Journal of Catastrophology, 1987, 2(2): 25-33. 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987, 2(2): 25-33.
- [9] WEN C J. Generalized disaster, disaster chain and their prevention and control[J]. Journal of Catastrophology, 2000, 15(4): 14-19. 文传甲. 广义灾害、灾害链及其防治探讨[J]. 灾害学, 2000, 15(4): 14-19.
- [10] WEN C J. On atmospheric disaster chain[J]. Journal of Catastrophology, 1994, 9(3): 1-6. 文传甲. 论大气灾害链[J]. 灾害学, 1994, 9(3): 1-6.
- [11] TIAN L Q. Regional differentiation of the mountain hazard chain in southwest China[J]. Mountain Research, 1995, 13(2): 116-120. 田连权. 西南山地灾链的区域分异[J]. 山地研究, 1995, 13(2): 116-120.
- [12] XIAO S X, FENG Y T, WANG Z H, et al. Shape characteristics of evolvement in chain-styled phases of disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Suppl. 1): 2629-2633. 肖盛燮, 冯玉涛, 王肇慧, 等. 灾变链式阶段的演化形态特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2629-2633.
- [13] ZHOU J F. Natural disaster chain and building of chain-cutting disaster mitigation frame[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(6): 202-203. 周菊芳. 自然灾害链及其断链减灾框架构建[J]. 山西建筑, 2007, 33(6): 202-203.
- [14] HAN J L, WU S R, WANG H B. Preliminary study on geological hazard chains[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 11-23. 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11-23.
- [15] LI M, TANG H M, YES S Q. Research on chain rule of typical geological disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(1): 3-7. 李明, 唐红梅, 叶四桥. 典型地质灾害链式机理研究[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 3-7.
- [16] CUI Y, KONG J M, WU W P. Cause characteristics and prevention/control strategies of the secondary mountain disaster chain of the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Natural Disaster, 2012, 21(1): 109-116. 崔云, 孔纪名, 吴文平. 汶川地震次生山地灾害链成灾特点与防治对策[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 109-116.
- [17] WANG Z L, GENG P X, WANG H R. Geological hazard chains and practice of chain-cutting disaster mitigation in coal mining area[J]. Areal Research and Development, 2011, 30(5): 156-160. 王卓理, 耿鹏旭, 王海荣. 矿山地质灾害链及其断链减灾实践研究[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(5): 156-160.

- [18] ZHU X H, PENG X H, TONG X, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017(1): 117-122. 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探[J]. *工程地质学报*, 2017(1): 117-122.
- [19] WANG K, ZHONG S B, YANG Y S, et al. Construction and application of marine disaster chains[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(4): 232-237. 王可, 钟少波, 杨永胜, 等. 海洋灾害链及应用[J]. *灾害学*, 2018, 33(4): 232-237.
- [20] CHEN G Q, FAN Y A, LI Y G. Hazard mapping for earthquake-induced geo-disaster chain[M]//HAZARIKA H, KAZAMA M, LEE W. *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls*. Tokyo: Springer, 2017.
- [21] PAN M, LI T F. *Disaster geology*[M]. Beijing: Peking University Press, 2002. 潘懋, 李铁锋. *灾害地质学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [22] State Ocean Administration People's Republic of China. 2017 Chinese sea level bulletin[EB/OL]. (2018-04-23)[2019-02-19]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798298.html. 国家海洋局. 2017 年中国海平面公报[EB/OL]. (2018-04-23)[2019-02-19]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798298.html.
- [23] HOPFENSBERGER K N, BURGIN A J, SCHOEPFER V A, et al. Impacts of saltwater incursion on plant communities, anaerobic microbial metabolism, and resulting relationships in a restored freshwater wetland[J]. *Ecosystems*, 2014, 17(5): 792-807.
- [24] VALLEJOS A, SOLA F, PULIDO-BOSCH A. Processes influencing groundwater level and the freshwater-saltwater interface in a coastal aquifer[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(3): 679-697.
- [25] COLOMBANI N, MASTROCICCO M. Scenario modelling of climate change's impact on salinization of coastal water resources in re-claimed lands[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 162: 25-31.
- [26] VU D T, YAMADA T, ISHIDAIRA H. Assessing the impact of sea level rise due to climate change on seawater intrusion in Mekong Delta, Vietnam[J]. *Water Science & Technology*, 2018: wst2018038.
- [27] MICHAEL A M. *Irrigation: theory and practice*[M]. New Delhi: Vikas Publishing House, 2001.
- [28] BENNETT S J, BARRETTLENNARD E G, COLMER T D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: a review[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 349-360.
- [29] GUO Q E, WANG Y Q, GUO T W, et al. Relationship between environment factors and topsoil salt accumulation in semiarid regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 957-963. 郭全恩, 王益权, 郭天文, 等. 半干旱地区环境因素与表层土壤积盐关系的研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 957-963.
- [30] FANG H L, LIU G H, KEARNEY M. Georelational analysis of soil type, soil salt content, landform, and land use in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(1): 72-83.
- [31] MA G B, LIU W Q, YU H J, et al. Characteristics of soil salinity under the cases of different land use and land covers in the southern coastal area of the Laizhou Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 33(4): 58-65. 马恭博, 刘文全, 于洪军, 等. 莱州湾南岸不同土地利用和土地覆被下土壤盐分含量特征[J]. *海岸工程*, 2014, 33(4): 58-65.
- [32] LIU G M, YANG J S. Salt dynamics in soil under conditions of different groundwater tables and salinities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 65-69. 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 65-69.
- [33] XIE T, LIU X H, SUN T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(2): 241-252.
- [34] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 46-64.
- [35] JORDÁN M M, NAVARRO-PEDREÑO J, GARCAÍ-SÁNCHEZ E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications[J]. *Environmental Geology*, 2004, 45(4): 448-456.
- [36] WANG Y, XIAO D, LI Y, et al. Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 140(1-3): 291.
- [37] HILLEL D. *Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment and economics*[J]. *Environmentally & Socially Sustainable Development*, 2000.
- [38] SCHMIDT C M. Estimation of ameliorative conditions of the irrigated lands in Uzbekistan[R]. SANIIRI scientific report (in Russian), 1985, Tashkent, Uzbekistan.
- [39] DALIAKOPOULOS I N, PAPPAS P, GRILLAKIS M G, et al. Modeling soil salinity in greenhouse cultivations under a changing climate with saltmed: model modification and application in Timpaki, Crete[J]. *Soil Science*, 2016, 181: 1.
- [40] RUSSAK A, SIVAN O. Hydrogeochemical tool to identify salinization or freshening of coastal aquifers determined from combined field work, experiments, and modeling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(11): 4096-4102.
- [41] MEHNERT E, JENNINGS A A. The effect of salinity-dependent hydraulic conductivity on saltwater intrusion episodes[J]. *Journal of Hydrology*, 1985, 80(3-4): 283-297.

- [42] FU T F. The temporal and spatial variation of soil salinization in typical coastal area and application research of the monitoring system [J]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2015. 付腾飞. 滨海典型地区土壤盐渍化时空变异及监测系统研究应用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
- [43] SALEHIN M, CHOWDHURY S M, CLARKE D, et al. Mechanisms and drivers of soil salinity in coastal Bangladesh[M] // NI-CHOLLS R J, HUTTON C W, ADGER W N, et al. Ecosystem Services for Well-Being in Deltas. Palgrave Macmillan, 2018.
- [44] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 46-64.
- [45] GONG L, RAN Q, HE G, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya River basin, Southern Xinjiang, China[J]. Soil Tillage Research, 2015, 6: 223-229.
- [46] LI J, PU L, HAN M, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects[J]. Journal of Geogr Science, 2014, 24(5): 943-960.
- [47] MA H, LÜ Y, LI H X. Complexity of ecological restoration in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 52(3): 75-78.
- [48] SCUDIERO E, SKAGGS T H, CORWIN D L. Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA[J]. Geoderma Regional, 2014(2-3): 82-90.
- [49] XU X Z, OLIPHANT J L, TICE A R. Factors affecting water migration in frozen soil[R]. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report, 1987, 9: 1-16.
- [50] NA P S, XU S L. An approach to the formation mechanism of frozen perched ground water[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(3): 273-278. 那平山, 徐树林. 冻结滞水形成机制的探讨[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 273-278.
- [51] SU Q, XU X Y, CHEN G Q, et al. Study on the impact of tides on groundwater table fluctuation in coastal aquifer[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 568-578. 苏乔, 徐兴永, 陈广泉, 等. 潮汐作用对莱州湾南岸冬季地下水位的影响研究[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 568-578.
- [52] SU Q, YU H J, XU X Y, et al. Hydrochemical characteristics of underground brine in littoral plain south of Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(2): 163-169. 苏乔, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸滨海平原地下卤水水化学特征[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(2): 163-169.
- [53] ROBINSON M, DAN G, REAY W. Field observations of tidal and seasonal variations in ground water discharge to tidal estuarine surface water[J]. Ground Water Monitoring & Remediation, 1998, 18(1): 83-92.
- [54] HILLEL D. Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment and economics[M]. World Bank Publications, 2000.
- [55] SCHMIDT C M. Estimation of ameliorative conditions of the irrigated lands in Uzbekistan[R]. SANIIRI Scientific Report (in Russian), 1985, Tashkent, Uzbekistan.
- [56] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges[J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 3-26.
- [57] WERNER A D. The interaction between a tidal estuary and a shallow unconfined aquifer: a saltwater intrusion and environmental impacts in the riparian zone[D]. Queensland: The University of Queensland, 2004.
- [58] ARSLAN H, DEMIR Y. Impacts of seawater intrusion on soil salinity and alkalinity in Bafra Plain, Turkey[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(2): 1027-1040.
- [59] QIN D H, CHEN Z L, LUO Y, et al. Updated understanding of climate change sciences[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(2): 63-73. 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [60] ATAIE-ASHTIANI B, WERNER A D, SIMMONS C T, et al. How important is the impact of land-surface inundation on seawater intrusion caused by sea-level rise?[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(7): 1673-1677.
- [61] MEHDIZADEH S S, KARAMALIPOUR S E, ASOODEH R. Sea level rise effect on seawater intrusion into layered coastal aquifers (simulation using dispersive and sharp-interface approaches)[J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 138: 11-18.
- [62] WOODRUFF J D, IRISH J L, CAMARGO S J. Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise[J]. Nature, 2013, 504(7478): 44-52.
- [63] ZUO J C, ZUO C S, LI J, et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(5): 442-449. 左军成, 左常圣, 李娟, 等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 442-449.
- [64] LONG F H, SHI X F, LUO X Z. The impact prediction of sea level rise on the inundated area caused by 100-year-recurrence-period storm surge of Shandong Province around Bohai Bay[J]. Marine Environmental Science, 2015(2): 211-216. 龙飞鸿, 石学法, 罗新正. 海平面上升对山东沿渤海湾地区百年一遇风暴潮淹没范围的影响预测[J]. 海洋环境科学, 2015(2): 211-216.

- [67] CHESNAUX R. Closed-form analytical solutions for assessing the consequences of sea-level rise on groundwater resources in sloping coastal aquifers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(7): 1-15.
- [68] KETABCHI H, MAHMOODZADEH D, ATAIE-ASHTIANI B, et al. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 235-255.
- [69] MORGAN L K, BAKKER M, WERNER A D. Occurrence of seawater intrusion overshoot[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 1989-1999.
- [70] QIAN J D, DENG M D, YIN J Y, et al. Basic experimental study of earthquake prediction in terms of radar technology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1103-1109. 钱家栋, 邓明德, 尹京苑, 等. 雷达用于地震预测的基础实验研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1103-1109.
- [71] MA J, CHEN S Y, LIU P X, et al. Temporal-spatial variations of associated faulting inferred from satellite infrared information: a case study of the N-S seismo-tectonic zone in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 816-823. 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 等. 用卫星热红外信息研究关联断层活动的时空变化—以南北地震构造带为例[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 816-823.
- [72] State Ocean Administration People's Republic of China. 2017 bulletin of China marine disaster[EB/OL]. (2018-04-23)[2019-02-19]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798021.html. 国家海洋局. 2017 年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2018-04-23)[2019-02-19]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798021.html.

Progress and Prospect of the Research on Seawater Intrusion to Soil Salinization Disaster Chain

XU Xing-yong^{1,2,3}, FU Teng-fei^{1,2,3}, XIONG Gui-yao⁴, SU Qiao^{1,2,3},
LIU Wen-quan^{1,2,3}, CHEN Guang-quan^{1,2,3}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China;*

4. *School of Ocean Sciences, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)*

Abstract: The disaster chain is a highly destructive chain structure, including a variety of disasters that are sequential, spatially dependent, related genetically to each other. Due to the superposition, amplification and chain effect during the period of the formation and evolution of the disaster chain, it is one of hotspot and difficult points in disaster research. Affected by global climate change and human factors, the coastal zone is the most active and vulnerable region on the Earth. Seawater intrusion, together with soil salinization, have become the main geological disasters in the coastal zone, threatening ecological security and human living environment. These two types of disasters have sequentially occurred and are related to each other, forming a seawater intrusion-soil salinization disaster chain. Finally, this study summarizes the research progress of the disaster chain, indicates the evolution characteristics of the disaster chain and the key scientific problems, and forecasts the research trend of the disaster chain.

Key words: disaster chain; geological disaster; seawater intrusion; soil salinization; disaster prevention

Received: February 20, 2019