海水入侵与土壤盐渍化现状及生态修复措施研究

——以潍坊北部地区为例

张 颖[1,2], 韩伟涛[1,2*]

（1. 潍坊市海洋发展研究院, 山东 潍坊 261000;
2. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061）

摘 要：针对潍坊市北部沿海研究区域，以海水入侵与土壤盐渍化为研究对象，设置了监测断面、站位（监测井），选取了地下水电导率等监测指标对海水入侵程度、土壤盐渍化类型及程度等进行分析研究。2022 年监测结果显示，研究区域受到海水入侵影响，且监测站位的海水入侵程度以严重入侵居多；土壤盐渍化类型以硫酸盐类型为主，其占比达 73.69%，研究区盐渍化类型及程度整体情况为：轻盐渍化土（47.37%）大于盐土（21.06%）大于中盐渍化土（13.16%）大于非盐渍化土（10.53%）大于重盐渍化土（7.89%），海水入侵与土壤盐渍化趋势具有一致性。总结提出 4 条生态修复措施，以期为莱州湾沿岸城市及全国海水入侵城市生态修复提供理论思路和实践经验。

关键词：海水入侵；土壤盐渍化；生态修复；潍坊
中图分类号：X832；X833 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-3682（2024）02-0142-12
doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20230904001
引用格式：张颖, 韩伟涛, 2024. 海水入侵与土壤盐渍化现状及生态修复措施研究——以潍坊北部地区为例[J]. 海岸工程, 43(2): 142-153. ZHANG Y, HAN W T, 2024. Study on the status of seawater intrusion and soil salinization and the ecological restoration measures: taking the northern region of Weifang as example[J]. Coastal Engineering, 43(2): 142-153.

海水入侵是指由于自然或人为原因，海岸带地下水动力条件发生变化，使地下含水层中的淡水与海水之间的平衡遭到破坏，导致海水或与海水有力联系的高矿化地下咸水沿含水层向内陆扩侵的现象；土壤盐渍化是指土壤中积聚盐分形成盐渍土的过程。两者均为海岸带重要的地质灾害类型（洪云等, 2012; 苗青等, 2013），会导致环境恶化，资源贫乏，甚至影响人体健康。沿海地区作为我国经济发展的排头兵，在大力发展经济、加快城镇化过程中，生态破坏、环境污染等问题也日益显现。过度开采地下水已成为沿海地区海水入侵的最主要人为因素（熊贵耀等, 2019; 王建等, 2020），会造成土壤盐渍化等危害，有研究表明海水入侵和土壤盐渍化属于典型的链式结构危害，在时间、空间、成因上密切相关（徐兴永等, 2020; 杨坤, 2021）。

自 20 世纪 70 年代以来，海水入侵灾害已成为我国比较突出的环境灾害，辽宁、上海、广东、广西、天津和河北等省市均有发生（李晶莹等, 2010）。滨海地区海水入侵与土壤盐渍化灾害有关研究一直为大量学者研究的热点，国外有学者研究表明，海水入侵与土壤盐渍化存在链式关系，其

收稿日期：2023-09-04
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课题（2023COSIMQZ001）；自然资源部渤海生态预警与保护修复重点实验室开放基金项目（2022108）
作者简介：张 颖（1983—），女，高级工程师，硕士，主要从事海洋生态环境监测评价和现代海洋产业方面研究. E-mail: 274926095@qq.com
*** 通信作者：**韩伟涛（1978—），男，高级工程师，主要从事海洋生态与灾害和现代海洋产业方面研究. E-mail: hwt110@126.com

（胡筱敏 编辑）

机制为咸淡水楔形体运移，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(Safari, 2002; Eldeiry et al, 2010; Colomban et al, 2016; Vudt et al, 2018)。在非饱和包气带区域，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(Hillel, 2000)。高铭骏等(2022)研究结果表明地下水埋深、矿化度与土壤全盐含量呈现较高相关性，其研究区域海水入侵对土壤盐渍化有直接影响，贡献率达 50% 以上；刘衍君等(2012)研究结果则表明，其研究区域地下水矿化度(Total Dissolved Solid, TDS)与土壤全盐量相关系数达 0.87，海水入侵与土壤盐渍化具有典型相关关系。

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。在海水入侵与土壤盐渍化研究防治等方面，尤其是针对特定地区灾害现状开展生态修复，还面临大量的科学难题，并缺乏相关实践经验。山东莱州湾南岸地区以其独特的地理位置、地质环境演化背景和对气候变化的敏感性，再加上经济的高速发展、人口压力剧增，人类活动对环境的扰动显得尤为突出，莱州湾南岸已经成为海水入侵最典型，危害最严重的地区(韩美, 1997; 刘恩峰等, 2004; 杨坤, 2021)，其地下水矿化度、土壤理化性质、含盐量等要素变化尤为明显(张祖陆等, 2001)。潍坊市位于渤海莱州湾南岸，卤水资源丰富，在大力开发利用卤水资源的同时，造成了海水入侵严重，滨海土壤含盐量升高，严重阻碍了城市的健康持续发展。已有学者对莱州湾地区、辽东湾地区海水入侵及土壤盐渍化分布特征等进行了研究(韩美, 1997; 张祖陆等, 2001; 刘恩峰等, 2004; 李晶莹等, 2010; 王欣等, 2012; 王传等, 2015; 杨坤, 2021)，但专门针对潍坊市北部沿海地区海水入侵与土壤盐渍化现状及生态修复措施的研究较少。因此，探究潍坊市北部沿海海水入侵与土壤盐渍化现状，提出针对性的生态修复措施，不仅对于潍坊市缓解土壤盐渍化压力和生态保护修复具有重要的现实意义和生态效益，也可为后期莱州湾沿岸其他城市海水入侵与土壤盐渍化防治的研究提供参考。

1　研究区概况

潍坊市位于渤海莱州湾南岸，海岸线长 158 km，海域面积约 1 300 km^2，天然卤水是潍坊市优势特色资源，储量居全国首位。近年来，潍坊市依托卤水资源，大力发展海洋化工产业，在取得经济效益的同时，造成了环境的破坏，目前潍坊市沿海地区土壤含盐量高，据潍坊市海洋发展和渔业局编制的 2022 年潍坊市海水入侵监测报告[①]显示，潍坊北部沿海重度盐渍化以上面积达 936.3 km^2。本文研究区设置在昌邑市、滨海区、寒亭区和寿光市，这 4 个区市是潍坊北部重要的沿海区市，其中昌邑市、寿光市名列全国经济实力百强县，滨海区为国家级开发区，在大规模发展经济的同时，这些区域也成为了海水入侵、土壤盐渍化程度最严重的地区。2017 年监测数据显示：寿光市海水入侵距离为 21.67 km、土壤盐渍化距岸距离为 15.10 km；滨海区海水入侵距离为 23.30 km、土壤盐渍化距岸距离为 18.51 km；昌邑市柳疃镇海水入侵距离为 15.91 km、土壤盐渍化距岸距离为 13.78 km；昌邑市下营镇水海入侵距离为 16.90 km、土壤盐渍化距岸距离为 14.56 km[②]。

2　数据与方法

2.1　监测点确定

经查阅资料和调研取证，综合考虑潍坊北部自然气候、地理位置、水文气象、海水入侵与土壤

①潍坊市海洋发展和渔业局, 2022. 2022 年潍坊市海水入侵监测报告.

②潍坊市海洋与渔业局, 2018. 2017 年潍坊市海洋环境状况公报.

盐渍化历史状况等因素确定监测断面和监测站位。监测断面垂直于海岸线布设，在确定的盐渍化监测区域内，按 HY/T 0320—2021《滨海土壤盐渍化监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021a)和 HY/T 0314—2021《海水入侵监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021b)要求的断面布设间距不超过 25 km、土壤盐渍化严重区断面间距不超过 10 km，在昌邑市、滨海区、寒亭区、寿光市设置监测断面 5 条，自西向东分别为昌邑下营断面(开展海水入侵和土壤盐渍化监测)、昌邑柳疃断面(开展土壤盐渍化监测)、滨海-寒亭断面(开展海水入侵和土壤盐渍化监测)、滨海-寿光断面(开展海水入侵和土壤盐渍化监测)、寿光断面(开展土壤盐渍化监测)，共设置海水入侵监测井 12 个、土壤盐渍化监测站位 19 个。监测井和监测站位置分布见图 1。

图 1 研究区监测井、监测站位和断面位置分布

Fig. 1 Distributions of monitoring stations, wells and sections in the study area

2.2 样品采集与监测项目

潍坊市海洋发展研究院在研究区开展了海水和土壤样品采集。海水样品采用自动监测系统对 12 个海水入侵监测井(站位见图 1)开展监测，无须采集样品。海水入侵监测主要包括地下水电导率、水温和水位三个项目，每小时监测一次。海水样品监测项目参照 HY/T 0314—2021《海水入侵监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021b)。

土壤样品采用人工采样，使用手持 GPS 进行精确定位，于 2022 年 4 月(枯水期)、8 月(丰水期)在布设的 19 个土壤盐渍化监测站位(图 1)各取样一次，共获得土壤样品 38 个。采集的每个土壤样品质量为 1 kg 左右，分别密封于塑料自封样品袋中，实验室风干过筛后充分混匀，放入样品瓶中备用。土壤盐渍化监测主要包括 Cl^-含量、SO_4^{2-}含量、全盐含量、pH 和电导率五个项目，采用人工实验室分析。土壤样品监测项目参照 HY/T 0320—2021《滨海土壤盐渍化监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021a)，分别是 NY/T 1121.17—2006《土壤检测：第 17 部分 土壤氯离子含量的测定》(中华人民共和国农业部, 2006a)的硝酸银($AgNO_3$)滴定法、NY/T 1121.18—2006《土壤检测：第 18 部分 土壤硫酸根离子含量的测定》(中华人民共和国农业部, 2006b)的 EDTA 间接滴定法、NY/T 1121.16—2006《土壤检测：第 16 部分 土壤水溶性盐总量的测

定》(中华人民共和国农业部, 2006c)的全盐含量为重量法、NY/T 1121.2—2006《土壤检测：第 2 部分　土壤 pH 的测定》(中华人民共和国农业部, 2006d)、HJ 802—2016《土壤 电导率的测定 电极法》(中华人民共和国环境保护部, 2016)的电极法。

2.3　评价标准

选取 25 ℃ 电导率(自动监测)作为衡量海水入侵程度指标，25 ℃ 电导率 1.6 mS/cm 为海水入侵判定标准(赵建, 1998; 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021b; 高铭骏等, 2022)。根据 25 ℃ 地下水电导率将海水入侵现状评价等级划分为无入侵、轻度入侵和严重入侵三种类型，海水入侵距离、海水入侵面积计算及现状等级图示参照 HY/T 0314—2021《海水入侵监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283)，2021b)。根据 Cl^-含量与SO_4^{2-}含量的比值确定盐渍化的类型，再根据土层含盐量确定各种盐渍化类型的盐渍化程度，将土壤分为非盐渍化土、轻盐渍化土、中盐渍化土、重盐渍化土和盐土五种，参照 HY/T 0320—2021《滨海土壤盐渍化监测与评价技术规程》(全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021a)计算土壤盐渍化离岸距离和面积，并设计现状评价图。

3　结果与分析

3.1　海水入侵监测结果

通过对 12 个海水入侵监测井的自动监测分析，共获得监测数据 43 312 组(个)。海水入侵监测结果见表 1。监测数据显示，设置的监测井全部发生了海水入侵，其中严重入侵监测井 7 个，占比达 58.3%；轻度入侵监测井 5 个，占比 41.7%。BH01、BH02、BH03、CY04 和 CY05 五个监测井 25 ℃ 电导率平均值较低，范围为 2.570～3.267 mS/cm，海水入侵程度为轻度入侵；BH05、BH07、BH08、CY01、CY02、SG01-2 和 SG01-3 七个监测井 25 ℃ 电导率平均值较高，范围为 5.867～49.440 mS/cm，海水入侵程度为严重入侵；SG01-2 和 SG01-3 监测井 25 ℃ 电导率平均值最高，超出判定标准线(1.6 mS/cm)的 30 多倍，春季(4 月)25 ℃ 电导率平均值为 12.591 mS/cm，夏季(8 月)25 ℃ 电导率平均值为 11.963 mS/cm。空间分布上看，25 ℃ 电导率平均值由海向陆逐渐降低，海水入侵程度逐渐减缓；时间变化上看，春季(4 月)25 ℃ 电导率平均值略高于夏季(8 月)，海水入侵程度夏季低于春季。

表 1　海水入侵监测数据

Table 1　Monitoring data of seawater intrusion

监测井	位 置	数据数量/组	水温平均值/℃	25 ℃ 电导率平均值/(mS·cm^{-1})	埋深水位/m	海水入侵程度
BH01	(119°14′51.72″E, 37°11′10.68″N)	6 579	15.500	2.688	4.870	轻度入侵
BH02	(119°14′24.72″E, 37°09′06.84″N)	5 441	16.000	2.630	16.220	轻度入侵
BH03	(119°13′47.28″E, 37°04′59.88″N)	6 190	16.330	2.570	1.079	轻度入侵
BH05	(119°09′22.68″E, 36°55′33.24″N)	946	15.086	5.867	5.475	严重入侵
BH07	(119°09′43.92″E, 36°57′11.52″N)	1 448	14.657	11.941	0.674	严重入侵
BH08	(119°16′46.56″E, 37°12′03.24″N)	854	15.900	32.840	4.523	严重入侵
CY01	(119°30′32.76″E, 37°05′39.12″N)	1 137	15.500	20.036	0.813	严重入侵
CY02	(119°28′11.64″E, 37°04′07.68″N)	8 583	15.300	8.134	30.114	严重入侵
CY04	(119°28′09.12″E, 36°54′34.92″N)	978	16.818	3.267	4.269	轻度入侵
CY05	(119°28′26.76″E, 36°56′58.56″N)	1 036	14.900	3.233	6.486	轻度入侵
SG01-2	(118°57′19.80″E, 37°15′36.36″N)	6 240	15.987	48.080	18.467	严重入侵
SG01-3	(118°57′07.80″E, 37°15′41.04″N)	3 880	15.616	49.440	15.200	严重入侵

监测分析显示，2022 年潍坊市北部沿海区域海水入侵总面积 2 900 km^2，严重入侵面积 2 300 km^2，总入侵面积与 2021 年基本一致[①]，海水入侵分界线沿昌邑夏店镇—昌邑市区北—双台镇—固堤镇—侯镇南—王高镇南—台头镇东西走向分布，入侵分布呈差异性特征。昌邑柳疃、寿光上口监测区域入侵距离为 28 km、32 km，入侵距离呈退缩态势；昌邑下营、滨海固堤监测区域入侵距离为 26 km 和 38 km，与 2018 年相比海水入侵距离增加 6.3 km 和 3.8 km。2022 年 4 月（枯水期）监测数据显示，寿光市羊口田柳监测区域的入侵距离为 42 km，已到达台头镇，为潍坊市海水入侵最远距离。海水入侵现状分布见图 2 。

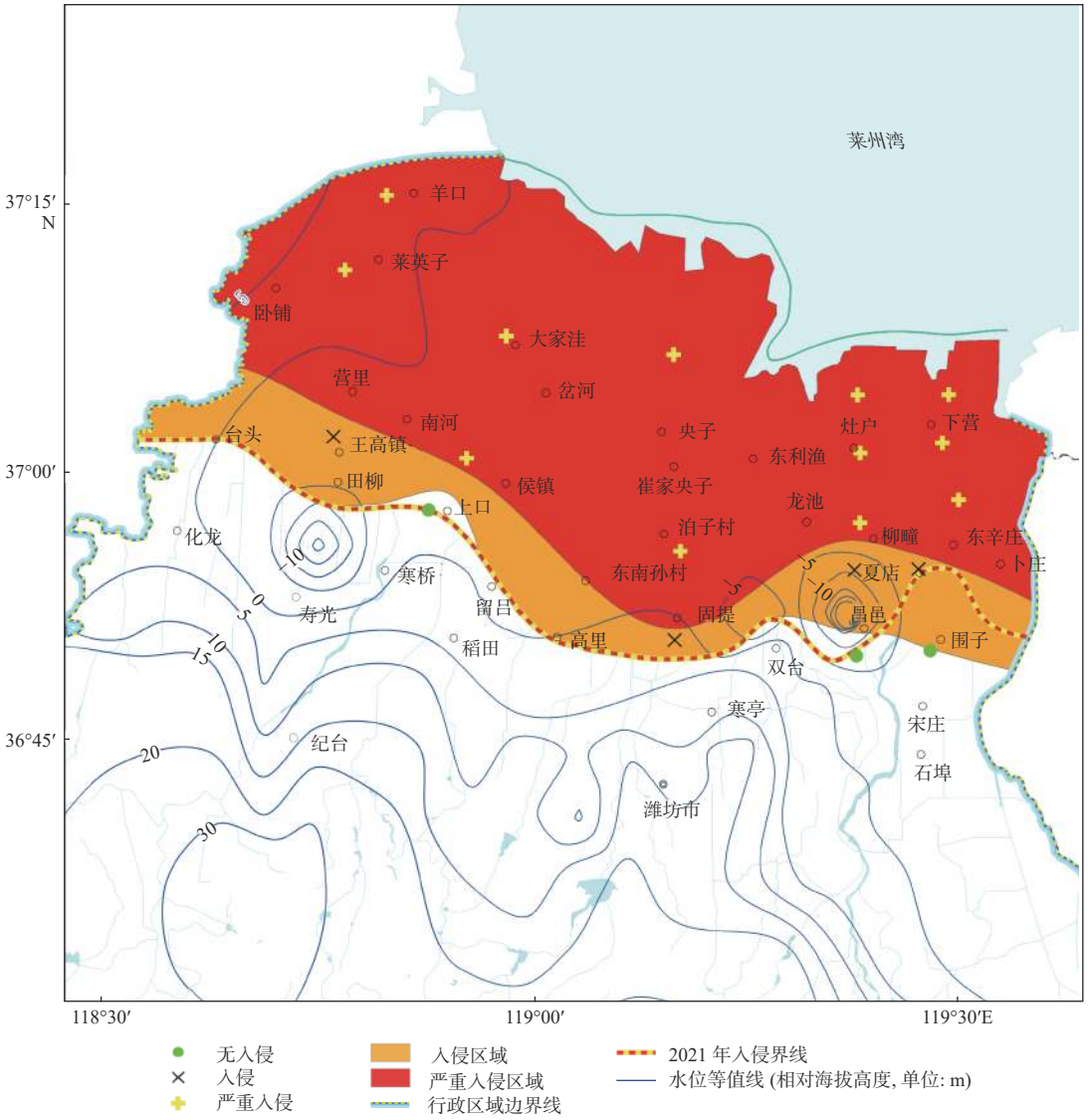

图 2　2022 年潍坊市北部沿海区域海水入侵现状

Fig. 2　Status of seawater intrusion in the northern coastal area of Weifang in 2022

3.2　土壤盐渍化监测结果

土壤样品监测数据（表 2）显示，获取的 38 个样品中，根据盐渍化类型划分，28 个样品为硫酸

①潍坊市海洋发展和渔业局, 2022. 2022 年潍坊市海水入侵监测报告.

盐型，6 个样品为硫酸盐-氯化物型，3 个样品为氯化物-硫酸盐型，1 个样品为氯化物型；根据盐渍化程度划分，8 个样品为盐土，3 个样品为重盐渍化土，5 个样品为中盐渍化土，18 个样品为轻盐渍化土，4 个样品为非盐渍化土。4 月土壤含盐量平均值为 0.876%，范围为 0.175%～3.980%，8 月土壤含盐量平均值为 0.864%，范围为 0.150%～3.920%，春季与夏季土壤含盐量基本持平。空间分布上看，土壤含盐量平均值由海向陆、由北向南逐渐降低，时间变化上看，春季(4 月)含盐量平均值与夏季(8 月)含盐量平均值基本一致，春季与夏季土壤含盐量基本持平。

监测分析显示，潍坊市北部沿海区域土壤盐渍化面积 2 795.8 km^2，重度盐渍化以上面积达 936.3 km^2。图 3 为土壤盐渍化现状，由图 3 可见，盐渍化强度由北向南递减、呈东西带状分布，重度盐渍化区域主要分布于羊口镇—菜央子—北单村—大家洼—林家央子村—东利渔村—下营镇以北，以南为中度以下盐渍化区域，该区域是土壤盐渍化生态改良和科学利用的重点区域，应加强监测，防止盐渍化面积进一步扩大。

表 2　土壤盐渍化监测数据

Table 2　Monitoring data of soil salinization

监测断面	监测站位	位置	监测月份	Cl^-含量/(g·kg^{-1})	SO_4^{2-}含量/(g·kg^{-1})	含盐量/%	Cl^-含量/SO_4^{2-}含量	盐渍化类型和程度
滨海-寿光断面	B6BT050	(118°55′31.35″E, 37°00′51.03″N)	4 月	0.57	4.99	0.650	0.11	硫酸盐型中盐渍化土
			8 月	0.36	5.09	0.775	0.07	硫酸盐型中盐渍化土
	B6BT051	(118°52′51.43″E, 36°57′55.55″N)	4 月	0.33	0.86	0.525	0.38	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	2.57	1.25	0.550	2.06	硫酸盐-氯化物型中盐渍化土
	B6BT049	(118°58′19.05″E, 37°07′46.74″N)	4 月	6.69	1.54	1.480	4.34	氯化物型盐土
			8 月	5.33	2.02	1.400	2.64	硫酸盐-氯化物型盐土
滨海-寒亭断面	B6BT058	(119°10′06.95″E, 37°06′40.83″N)	4 月	0.21	2.98	2.420	0.07	硫酸盐型盐土
			8 月	0.47	3.46	2.080	0.14	硫酸盐型盐土
	B6BT060	(119°10′08.99″E, 36°50′35.53″N)	4 月	0.17	1.54	0.475	0.11	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.24	1.44	0.55	0.17	硫酸盐型轻盐渍化土
	B6BT059	(119°10′33.74″E, 36°55′35.56″N)	4 月	0.07	0.77	0.525	0.09	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.97	0.96	0.625	1.01	硫酸盐-氯化物型重盐渍化土
昌邑柳疃断面	LT01	(119°22′48.55″E, 36°54′30.97″N)	4 月	0.11	4.51	0.415	0.02	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.31	4.13	0.525	0.08	硫酸盐型轻盐渍化土
	B6BT054	(119°23′12.21″E, 36°57′09.56″N)	4 月	1.04	1.06	0.400	0.98	氯化物-硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.17	2.11	0.325	0.08	硫酸盐型轻盐渍化土
	LT02	(119°22′55.97″E, 36°49′40.30″N)	4 月	0.19	1.44	0.175	0.13	硫酸盐型非盐渍化土
			8 月	0.41	2.21	0.150	0.19	硫酸盐型非盐渍化土
	B6BT053	(119°23′13.78″E, 37°01′07.59″N)	4 月	0.33	0.29	0.375	1.14	硫酸盐-氯化物型中盐渍化土
			8 月	0.36	1.44	0.300	0.25	硫酸盐型轻盐渍化土
	B6BT052	(119°23′05.79″E, 37°04′22.93″N)	4 月	3.69	0.96	1.150	3.85	硫酸盐-氯化物型盐土
			8 月	0.61	0.96	1.280	0.64	氯化物-硫酸盐型盐土
寿光断面	B6BT062	(118°46′58.01″E, 37°11′28.49″N)	4 月	0.16	7.78	0.475	0.02	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.38	5.76	0.450	0.07	硫酸盐型轻盐渍化土
	B6BT061	(118°49′52.48″E, 37°15′39.98″N)	4 月	0.33	2.59	1.680	0.13	硫酸盐型重盐渍化土
			8 月	0.37	2.98	1.420	0.12	硫酸盐型重盐渍化土
	B6BT063	(118°46′08.3″E, 37°02′04.18″N)	4 月	0.10	0.96	0.438	0.10	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.24	1.25	0.475	0.19	硫酸盐型轻盐渍化土

续表

监测断面	监测站位	位 置	监测月份	Cl^-含量/(g·kg^{-1})	SO_4^{2-}含量/(g·kg^{-1})	含盐量/%	Cl^-含量/SO_4^{2-}含量	盐渍化类型和程度
昌邑下营断面	XY02	(119°28′06.83″E, 36°49′55.69″N)	4 月	0.54	2.60	0.388	0.21	硫酸盐型轻盐渍化土
			8 月	0.22	3.12	0.425	0.07	硫酸盐型轻盐渍化土
	B6BT056	(119°29′01.86″E, 37°01′39.47″N)	4 月	0.13	2.02	0.250	0.06	硫酸盐型非盐渍化土
			8 月	0.23	2.02	0.275	0.11	硫酸盐型非盐渍化土
	B6BT055	(119°29′31.16″E, 37°04′23.51″N)	4 月	0.09	1.92	3.980	0.05	硫酸盐型盐土
			8 月	0.24	1.06	3.920	0.23	硫酸盐型盐土
	B6BT057	(119°27′18.57″E, 36°54′32.82″N)	4 月	0.23	0.19	0.275	1.21	硫酸盐-氯化物型轻盐渍化土
			8 月	0.31	0.86	0.325	0.36	硫酸盐型轻盐渍化土
	XY01	(119°30′10.29″E, 36°58′26.82″N)	4 月	0.63	1.45	0.575	0.43	硫酸盐型轻盐渍化土渍化土
			8 月	1.16	1.82	0.575	0.64	氯化物-硫酸盐型中盐渍化土

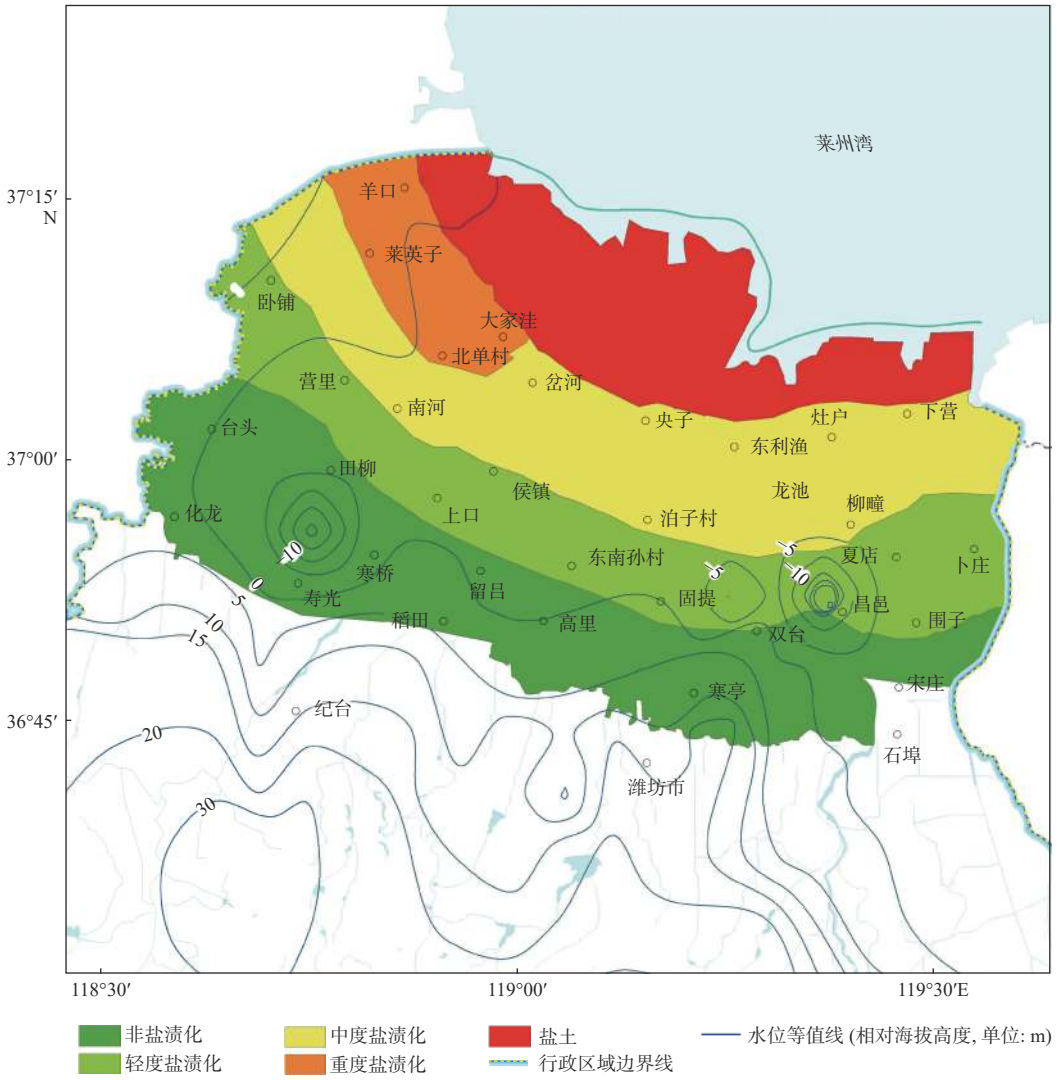

图 3 2022 年潍坊市北部沿海土壤盐渍化现状

Fig. 3 Status of soil salinization in the northern coastal area of Weifang in 2022

3.3　生态修复措施

3.3.1　加强基础监测

本文研究表明，研究区域内受到海水入侵影响，以严重入侵为重，且存在不同程度的土壤盐渍化，因此加强海水入侵、土壤盐渍化区域的监测，采用多种指标、多种方法综合评价海水入侵、土壤盐渍化的程度和范围，掌握入侵状况，为治理提供基础数据具有重要意义。当地政府与科研院所共建莱州湾海水入侵与土壤盐渍化野外科学观测研究站，经过 10 余年合作建设，已搭建完成野外站点、数据采集系统和平台监测分析系统。目前，潍坊建成自动监测站位 12 个，监测预警面积约 2 000 km^2，主要开展海水入侵灾害调查研究、防治治理、盐渍化改良等工作。

3.3.2　设立保护区

有研究表明，柽柳林对滨海滩涂土壤的改良效果相对最好(房颖等, 2023)。研究区域内山东昌邑国家级海洋生态特别保护区是目前国内唯一的以柽柳林生态系统作为主要管理和保护对象的国家级海洋保护区，保护区面积达 29.3 km^2(王学沁等, 2015)。在保护区内，按盐渍化程度的不同，以水盐胁迫为主线，配置合理的物种组成，减少物种间水分竞争，构建柽柳-赤碱蓬群丛、柽柳-二色补血草群丛、柽柳-羊角菜群丛等景观结构单元，形成和不同盐渍化程度相适宜的柽柳湿地景观恢复区域(刘衍君等, 2012)，达到了景观带打造与盐碱地修复的双重效果。

3.3.3　盐碱地改良利用

本文选取的研究区域寿光市、昌邑市、寒亭区、滨海区都受到不同程度的海水入侵和土壤盐渍化影响，4 个行政区域根据各自实际情况结合当地产业发展进行盐碱地改良，并取得了一定成效。寿光市盐碱地无土栽培技术的大规模应用与盐碱地治理改良后用于高附加值蔬菜生产的新模式，为全国盐碱地的治理与改良事业提供了新模式、新路径；昌邑市柳疃前三年种苜蓿，第四和第五年种棉花，第六年以后再种植小麦玉米等粮食作物，这样的种植顺序和模式有效降低了土壤中的盐碱含量；寒亭区与袁隆平院士团队围绕耐盐碱抗逆性海水稻，成功选育种植 6 个品种，通过种植海水稻，土壤盐碱度可由 5.9 降至 2.8，土壤微生物活性和有机质含量大幅提高；滨海区种植耐盐碱乔木型柽柳-盐松(鲁柽 1 号)约 70 万棵，总面积达 2 km^2，土壤含盐量从种植初期的 3‰降低到 1‰，土壤结构得到优化。

3.3.4　实施海岸带修复、防护林工程

盐碱地适合栽种柽柳、杨树、白柳、胡杨、沙枣、枸杞、白蜡、泡桐、钻天杨、小叶杨、加拿大杨、桉树、白蜡条及紫穗槐等植物，研究区域滨海区优选柽柳、白蜡、刺槐、榆树、黑松龙柏等适合盐碱地生长的树种，配合耐盐碱低矮灌木，形成北部沿海防护林带，在满足防风固沙、盐碱改良生态需求的同时，形成三季有花、四季常绿”的景观生态效果。结合潍坊白浪河、弥河、潍河等重点河流防洪治理生态修复，以及海岸带生态修复、“三边四区”生态建设等工程，提升滨海湿地生态景观效果。

4　结　论

对研究区域开展海水入侵、土壤盐渍化监测，利用监测获取的电导率、Cl^-含量、SO_4^{2-}含量、全盐含量等理化指标数据，分析了潍坊北部沿海地区海水入侵程度、土壤盐渍化类型及程度等现状情况，并根据当地实际情况因地制宜提出生态修复措施。得出主要结论如下。

1)2022 年海水监测结果显示，潍坊北部沿海区域全部发生海水入侵，总面积达 2 900 km^2，与 2021 年基本一致，海水入侵 25 ℃ 电导率最高值出现在寿光市，超出判定标准线 30 多倍。从南北向

分布看，海水入侵程度呈由海向陆、由北向南递减趋势；从东西向分布看，海水入侵呈东西较重，中间减缓的趋势。根据沿海地区海水入侵机制中的因素关系，诱发研究区域海水入侵因素包括自然因素和人为因素，其中自然因素主要包括降水量减少、地质构造影响、地形地貌因素、风暴潮影响，人为因素主要包括超量开采地下水、上游人工蓄水工程、海水养殖、扩建盐田等，不合理的地下水开采(包括过量开采与布井不合理)是导致海水入侵的直接原因，其问题的实质是水资源的供需失调。

2)2022 年土壤监测结果显示，潍坊市北部沿海区域土壤盐渍化面积为 2 795.8 km^2，土壤盐渍化含盐量最高值出现在昌邑市春季，超出盐土类型标准线 20 倍左右。盐渍化类型主要为硫酸盐型，占总样品数的 73.69%；其次为硫酸盐-氯化物型，占样品总数的 15.79%。盐渍化类型及程度整体情况为：轻盐渍化土(47.37%)大于盐土(21.06%)大于中盐渍化土(13.16%)大于非盐渍化土(10.53%)大于重盐渍化土(7.89%)。从南北向分布看，盐渍化强度由海向陆、由北向南递减、呈东西带状分布，与海水入侵趋势一致，据文献报道，土壤全盐与潜水的矿化度具有显著的相关性，表明咸水入侵对土壤盐分含量有着直接而明显的影响，是土壤盐分积聚的主要控制因素，咸水入侵造成了滨海地区土壤盐渍化的加重趋势，海水入侵是引起滨海土壤盐渍化的主要驱动力(李晶莹等, 2010; 刘衍君等, 2012; 高铭骏等, 2022)。有研究表明，土壤积盐受气候变化的影响呈明显的季节变化，春季雨季未到，随着气温升高，蒸发量远大于降水量，盐分随水分运动积聚表层，土壤呈积盐状态；夏季雨水多而集中，降水量大于蒸发量，盐分被雨水冲淋，土壤呈脱盐状态(付腾飞, 2015; 张天举等, 2019; 丁邦新等, 2020)，但研究区域春季与夏季土壤盐渍化程度基本一致，无明显积盐、脱盐现象，相关机理有待进一步研究验证。

3)研究区域因其独特的地理位置、地质环境、对气候变化的敏感性，对人类活动和自然因素而引起的自然灾害的耐受力较弱，是我国海水入侵和土壤盐渍化较重的地区之一。海水入侵与土壤盐渍化不仅会造成整个地表的盐碱化，导致土壤板结、肥力下降，抑制植物的生长等危害，还会破坏生态环境，盐渍化严重的地区生态环境脆弱，严重制约着经济社会发展和人民生活水平(周学良, 2022; 赵纪越等, 2022)。因此，在土壤盐渍化区域开展生态修复既响应国家绿水青山就是金山银山号召，也提高当地软实力的重要举措。本文通过查阅文献、调研取证，结合当地实践经验，总结了加强基础监测，设立保护区，改良利用盐碱地，实施海岸带修复、防护林工程四条生态修复措施，以期为莱州湾沿岸城市及全国海水入侵城市生态修复提供理论思路和实践经验。

参考文献 (References)：

丁邦新, 白云岗, 柴仲平, 等, 2020. 塔里木河下游绿洲灌区土壤盐渍化特征及季节性变化规律[J]. 水土保持通报, 40(2): 77-84. DING B X, BAI Y G, CHAI Z P, et al, 2020. Soil salinization characteristics and its seasonal variation in oasis irrigation district of lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 40(2): 77-84.

房颖, 徐华, 韩红艳, 等, 2023. 昌邑国家级海洋生态特别保护区柽柳林对土壤的改良效果研究[J]. 湿地科学, 21(1): 35-43. FANG Y, XU H, HAN H Y, et al, 2023. Effect of tamarix chinensis forest on soil improvement in Changyi National Ocean Ecology Special Protection Zone[J]. Wetland Science, 21(1): 35-43.

付腾飞, 2015. 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]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所). FU T F, 2015. The temporal and spatial variation of soil salinization in typical coastal area and application research of the monitoring system[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology).

高铭骏, 汪旭, 孟玲珑, 等, 2022. 沿海发展区海水入侵与土壤盐渍化空间关联解析[J]. 环境化学, 41(3): 987-998. GAO M J, WANG X, MENG L L, et al, 2022. Spatial correlation analysis of seawater intrusion and soil salinization in coastal developed area[J]. Environmental Chemistry, 41(3): 987-998.

韩美, 1997. 山东省莱州湾地区海水入侵对社会与经济的影响[J]. 自然灾害学报, 6(1): 82-87. HAN M, 1997. The effects of seawater intrusion to economy and society in Laizhou Bay Region[J]. Journal of Natural Disasters, 6(1): 82-87.

洪云, 蔡建堤, 陈财珍, 等, 2012. 福建省漳浦县海岸带海水入侵和土壤盐渍化现状[J]. 福建水产, 34(3): 208-212. HONG Y, CAI J D, CHEN C Z, et al, 2012. The status of seawater intrusion and soil salinization in coastal belt of Zhangpu County, Zhangzhou City, Fujian Province[J]. Journal of Fujian Fisheries, 34(3): 208-212.

李晶莹, 韦政, 2010. 莱州湾海水入侵及土壤盐渍化现状研究[J]. 安徽农业科学, 38(8): 4187-4189. LI J Y, WEI Z, 2010. Studies on the status of seawater intrusion and soil salinization in Laizhou Bay[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 38(8): 4187-4189.

刘恩峰, 张祖陆, 沈吉, 等, 2004. 莱州湾南岸潍河下游地区咸水入侵灾害成因及特征[J]. 地球科学与环境学报, 26(3): 78-82, 87. LIU E F, ZHANG Z L, SHEN J, et al, 2004. Origin and characteristics of salt-water intrusion disaster in the downstream of Weihe River on the south coast of Laizhou Bay[J]. Journal of Earch Sciences and Environment, 26(3): 78-82, 87.

刘衍君, 曹建荣, 高岩, 等, 2012. 莱州湾南岸海水入侵区土壤盐渍化驱动力分析与生态对策[J]. 中国农学通报, 28(2): 209-213. LIU Y J, CAO J R, GAO Y, et al, 2012. The driving factors and ecological countermeasures of soil salinization in the seawater intrusion areas in the South of Laizhou Bay[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 28(2): 209-213.

苗青, 陈广泉, 刘文全, 等, 2013. 莱州湾地区海水入侵灾害演化过程及成因[J]. 海岸工程, 32(2): 69-78. MIAO Q, CHEN G Q, LIU W Q, et al, 2013. Disaster evolution and genesis of seawater intrusion in the Laizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 32(2): 69-78.

全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021a. 滨海土壤盐渍化监测与评价技术规程: HY/T 0320—2021[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2021a. Code of practice for coastal soil salinization monitoring and evaluation: HY/T 0320—2021[S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China.

全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283), 2021b. 海水入侵监测与评价技术规程: HY/T 0314—2021[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2021b. Technical specification for seawater intrusion monitoring and evaluation: HY/T 0314—2021[S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China.

王传, 吴英超, 王玉, 等, 2015. 辽东湾滨海地区土壤盐渍化分布及盐分特征分析[J]. 海洋环境科学, 34(6): 938-941. WANG C, WU Y C, WANG Y, et al, 2015. Distribution of soil salinization and analysis of salt characteristics in the coastal areas of Liaodong Bay[J]. Marine Environmental Science, 34(6): 938-941.

王建, 张军强, 任寒寒, 等, 2020. 莱州湾南部沿海地区环境地质现状及成因研究[J]. 海洋科学进展, 38(2): 336-347. WANG J, ZHANG J Q, REN H H, et al, 2020. Current situation and genesis of environmental geology in the coastal region of southern Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 38(2): 336-347.

王欣, 韩刚, 乔友乾, 等, 2012. 辽东半岛南部的海水入侵及其生态修复探讨[J]. 山西建筑, 38(9): 60-61. WANG X, HAN G, QIAO Y Q, et al, 2012. Discussion on seawater intrusion and ecological restoration of southern Liaodong Peninsula[J]. Shanxi Architecture, 38(9): 60-61.

王学沁, 衣华鹏, 高猛, 等, 2015. 昌邑国家级海洋生态特别保护区植物物种多样性[J]. 湿地科学, 13(3): 364-368. WANG X Q, YI H P, GAO M, et al, 2015. Plant species diversity of Changyi Ocean Ecology Special Protection Zone[J]. Wetland Science, 13(3): 364-368.

熊贵耀, 付腾飞, 徐兴永, 等, 2019. 滨海含水层海水入侵影响因素研究综述[J]. 海洋科学, 43(6): 102-112. XIONG G Y, FU T F, XU X Y, et al, 2019. Review of factors affecting seawater intrusion in coastal aquifers[J]. Marine Sciences, 43(6): 102-112.

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

杨坤, 2021. 莱州湾南岸微咸水灌溉条件下的土壤水盐运移研究[D]. 聊城: 聊城大学. YANG K, 2021. Study on soil water and salt migration under brackish water irrigation in the south bank of Laizhou Bay[D]. Liaocheng: Liaocheng University.

张天举, 陈永金, 刘加珍, 等, 2019. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征[J]. 生态学报, 39(9): 3322-3332. ZHANG T J, CHEN Y J, LIU J Z, et al, 2019. Characteristics of soil salinization in coastal wetlands based on canonical correspondence analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(9): 3322-3332.

张祖陆, 齐永华, 聂晓红, 等, 2001. 莱州湾南岸咸水入侵区生态环境分区与生态恢复研究[J]. 中国人口·资源与环境, 11(4): 102-105. ZHANG Z L, QI Y H, NIE X H, et al, 2001. A study on ecological restoration and adjustment in southern coastal saltwater intruded area of Laizhou Bay[J]. China Population, Resources and Environment, 11(4): 102-105.

赵纪越, 夏夜, 邹本东, 2022. 土壤盐渍化成因危害及恢复[J]. 农业与技术, 42(11): 115-119. ZHAO J Y, XIA Y, ZOU B D, 2022. Cause, damage and repair of soil salinization[J]. Agriculture and Technology, 42(11): 115-119.

赵建, 1998. 海水入侵水化学指标及侵染程度评价研究[J]. 地理科学, 18(1): 16-24. ZHAO J, 1998. Hydrochemical indexes of seawater intrusion and comprehensive judgement on intrusive degree[J]. Scientia Geographica Sinica, 18(1): 16-24.

周学良, 2022. 我国滨海土壤盐渍化现状及应对措施——以天津市滨海新区大港区为例[J]. 环境保护, 50(24): 61-64. ZHOU X L, 2022. Current situation and countermeasures of coastal soil salinization in China: take Dagang District, Binhai New Area, Tianjin as an example[J]. Envionmental Protection, 50(24): 61-64.

中华人民共和国农业部, 2006a. 土壤检测: 第17部分 土壤氯离子含量的测定: NY/T 1121.17—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006. Soil Testing: Part 17 Method for determination of soil chloride iron content: NY/T 1121.17—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.

中华人民共和国农业部, 2006b. 土壤检测: 第18部分 土壤硫酸根含量的测定: NY/T 1121.18—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006. Soil Testing: Part 18 Method for determination of soil sulfate content: NY/T 1121.18—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.

中华人民共和国农业部, 2006c. 土壤检测: 第16部分 土壤水溶性盐总量的测定: NY/T1121.16—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006. Soil Testing: Part 16 Method for determination of total water-soluble salt: NY/T1121.16—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.

中华人民共和国农业部, 2006d. 土壤检测: 第2部分 土壤pH的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006. Soil Testing: Part 2 Method for determination of soil pH: NY/T1121.2—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.

中华人民共和国环境保护部, 2016. 土壤 电导率的测定 电极法: HJ 802—2016[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2016. Soil quality-determination of conductivity-Electrode method: HJ 802—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China.

COLOMBANI N, MASTROCICCO M, 2016. Scenario modeling of climate change's impact on salinization of coastal water resources in reclaimed lands[J]. Procedia Engineering, 162: 25-31.

ELDEIRY A A, GARCIAL A, 2010. Comparison of ordinary kriging, regression kriging and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT image[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 136(6): 355-364.

HILLEL D, 2000. Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment and economics[M]. Washington DC: World Bank.

SAFARI M, 2002. Determination filtration network of groundwater using geostatistic method[D]. Islamic Republic of Iran: Tarbiat Modares University Agricultural Faculty.

VUDT, YAMADA T, SHDAIRA H, 2018. Assessing the impact of sea level rise due to climate change on seawater intrusion in Mekong Delta, Vietnam[J]. Water Science & Technology, 77(6): 1632-1639.

Study on the Status of Seawater Intrusion and Soil Salinization and the Ecological Restoration Measures: Taking the Northern Region of Weifang as Example

ZHANG Ying[1,2], HAN Weitao[1,2]

（1. *Weifang Marine Development Research Institute*, Weifang 261000, China;
2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management*, *MNR*, Qingdao 266061, China）

Abstract: The degree of seawater intrusion and the type and degree of soil salinization in the northern coastal area of Weifang are investigated by setting up the monitoring sections and stations (monitoring wells) and selecting the monitoring indicators like groundwater conductivity. The results monitored in 2022 showed that the study area had all been affected by seawater intrusion and the degree of intrusion was mostly severe. The salinization of soil was dominated by sulfate type, making up 73.69%. The overall status of the soil salinization in the study area was in order of decreasing light saline soil (47.37%), saline soil (21.06%), medium saline soil (13.16%), non saline soil (10.53%), heavy saline soil (7.89%). The trend of the seawater intrusion was consistent with that of the soil salinization. Based on the present study, four ecological restoration measures are proposed in order to provide theoretical ideas and practical experiences for the ecological restorations of the coastal cities along the Laizhou Bay and the cities invaded by seawater in China.

Keywords: seawater intrusion; soil salinization; ecological restoration; Weifang

Received: September 4, 2023