



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.015

许翼, 许士国, 冷祥阳, 等. 填海造陆区盐分运移过程室内模拟与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 101-108. XU Yi, XU Shi guo, LENG Xiang yang, et al. Laboratory simulation and analysis on the salt migration process of coastal reclaimed land[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 101-108. (in Chinese)

填海造陆区盐分运移过程室内模拟与分析

许翼^{1,2}, 许士国¹, 冷祥阳¹, 曹小磊², 徐向舟¹

(1. 大连理工大学 水环境研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳环境科学研究院, 沈阳 110016)

摘要: 在半湿润气候环境下, 围填海区的表层土壤正面临着复杂的盐渍化问题。以压实填土为研究对象, 通过土槽模型再现了潜水蒸发与侧向壤中流共同作用下的盐分运移过程, 以探明围填海区的盐渍土形成机制。结果表明, 在蒸发作用驱使下盐分向上补给, 表层土壤的初始积盐类型为 CaSO_4 , 海水对填土层的盐分补充导致积盐类型转变为 CaCl_2 和 NaCl 。在陆相渗流作用下, 填土中将形成相对稳定的渗流状态。自由水面线以上为积盐状态, 盐分类型以 CaCl_2 和 MgSO_4 为主; 自由水面线以下为脱盐状态, 盐分类型以 CaCl_2 和 NaCl 为主。土壤水盐的运移将改变酸碱度环境, pH 值将随着含盐量的增加先下降后上升。在陆相地下水的补给下, 填海造陆区的盐渍化防治工作应当重点关注地下存在挡水层或建筑物基础密集的地区。

关键词: 压实填土; 填海造陆; 盐分运移; 侧向流; 潜水蒸发

中图分类号: S156; X502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0101-08

Laboratory simulation and analysis on the salt migration process of coastal reclaimed land

XU Yi^{1,2}, XU Shi guo¹, LENG Xiang yang¹, CAO Xiao lei², XU Xiang zhou¹

(1. Institute of Water Environment Research, DUT, Dalian 116024, China;

2. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: In the semi humid climate, the surface soil of coastal reclaimed land is faced with a complicated salinization problem. To investigate the formation mechanism of saline soil in coastal reclaimed land, we studied the salt migration process under the joint action of phreatic evaporation and lateral interflow. The results showed that the initial salt type in the surface soil is CaSO_4 , and it gradually transitions to CaCl_2 and NaCl in the salt accumulation process. Under the action of terrestrial seepage, a stable wetting front moves to the coast while the water table rises. The area above the free water surface is in a salt accumulation state, with CaCl_2 and MgSO_4 as primary salt types. The area below the free water surface is in a state of desalination, with CaCl_2 and NaCl as primary salt types. Water and salt movement will change the pH value of the soil environment. The pH value will first increase and then decline as the salt content increases. Under the condition of terrestrial groundwater recharge, the salinization prevention and control work in coastal reclaimed land should focus on areas with underground water barriers or densely distributed building foundations.

Key words: compacted fill soil; land reclamation from sea; salt migration; lateral interflow; phreatic evaporation

近年来, 我国滨海地区填海造陆活动踊跃, 形成了数千平方公里的围填海区^[1]。由于北方地区平时

高温少雨且降雨集中, 地下径流常迟滞于地表径流出现, 加之滨海地区的地下水位较高, 因而形成了围

收稿日期: 2016-04-05 修回日期: 2016-06-01 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(51279022)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51279022)

作者简介: 许翼(1984), 男, 湖南岳阳人, 博士, 主要从事水环境保护与修复方面研究。E-mail: yxu@mail.dlut.edu.cn

填海区潜水蒸发与壤中流共同驱动下的土壤盐分运移过程,给滨海湿地造成了严重影响^[2]。在以往的研究中,学者们针对海水入侵区淡咸水界面推移过程中发生的盐分混合作用、离子交换吸附作用以及溶沉作用进行分析^[3],初步证明填海区的地下含水层将随着时间推移逐渐淡化^[4]。目前,针对盐分释放过程的研究多以湖库底泥或河口潮间带为背景,如 Gomez E. 等针对泻湖底泥中磷的吸收与释放过程及其影响因素进行分析^[5]。自南水北调工程东线和中线通水后,在平原水库蓄水过程中也普遍遭遇底泥盐分释放等新问题^[6-7]。因而,学者们开始针对滨海水库底泥中可溶性盐的吸附和释放过程进行研究^[8-9]。研究过程中采用的试验方法多采取换水或静水释放两种方式,同时考虑扰动、水深、温度等因素的影响^[10-11],也有学者通过现场调查地下水来研究海水入侵区的水岩间相互作用过程^[12-13]。学者们建立了底泥污染物的释放动力学模型^[4],并对营养盐的迁移转化过程进行分析^[15-16]。

与平原水库不同,填海造陆区的盐分吸附和释放环境为土壤环境,为饱和带和非饱和带的不充分释放过程。以往试验通常采用比较大的水土比,为充分释放的淡水释放过程^[17-18]。两者的差异就在于充分释放过程只需考虑土壤盐分的溶解速率,而不充分释放过程需同时考虑溶解速率和渗透速率两个因素。亦有学者利用土槽来模拟饱和带盐分的水平运移过程,但一维的物理模拟只能反映盐分的运移速率,难以反映出填海区水盐运移方向的变化。为了验证在雨季地下水位抬升时填海造陆区的盐分迁移过程,本文以地下水位抬升区的压实填土为研究对象,尝试通过土槽渗吸试验从二维尺度来模拟双重下压实填土中的水盐运移过程。另外,设定弱透水层用于模拟建成后大量建筑物基础的阻挡,研究成果也可用于反映滨海地下水库在初期蓄水过程中土壤盐分的分布和走向。

1 试验方案

1.1 试验设计与装置

试验在土槽模型中进行,模型高度为 0.6 m,模型比尺为 1:4 (图 1)。其中,压实填土部分为两个 0.5 m × 0.5 m × 0.3 m 土体单元组成。土槽模型与带刻度马氏瓶相连(Φ10 cm × 50 cm),马氏瓶的平均读数误差为 0.30 mm,可满足试验精度需求。设置透水隔板模拟填海区建筑基础,隔板上设置透水孔,孔径为 1.0 cm,间隔为 5.0 cm。侧面设置监测孔,从左至右五个取样点分别编号为 A-E,从上至下

依次为表层(45 cm)、次层(35 cm)、中层(25 cm)、下层(15 cm)和底层(5 cm)。

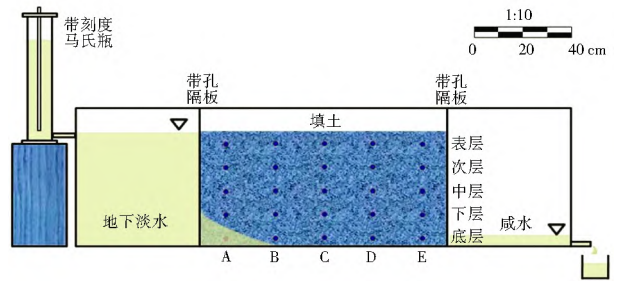


图 1 土壤水盐运移过程模拟试验装置

Fig. 1 Apparatus for soil water and salt migration simulation test

试验前,土槽及咸水侧蓄水槽内放入 10 cm 深的水以模拟填海前的海洋环境。分层填入土壤,每层高度为 5 cm,层间用毛刷刮毛。为模拟潜水蒸发过程,将土槽水平放置于室外自然蒸发 9 个月。蓄水槽上加盖不透光板以减少水量损失,降雨时在土槽上方覆盖雨布。9 个月后进入渗流阶段,模拟地下水位抬升形成侧向壤中流的过程。此时,清除海水并在淡水侧蓄水槽中放入地下淡水至 50 cm。连通马氏瓶并记录其供水量和渗出水量,测定渗出液的电导率直至土壤含水量基本达到稳定。期间,定期使用 IQ150 土壤 pH 计和 WET 传感器连续监测土壤 pH、电导率和体积含水量。每个阶段结束后,按监测点位分层取土,通过烘干法和滴定法测得质量含水量和含盐量,比较始末状态的水盐分布差异。

1.2 试验参数设置

试验土壤取自大连市某填海工程,经过风干、碾压并按照国家土壤分级标准 (GBJ 145-90) 进行筛分制备成室内试验土样。对土样的基本理化性质进行测定,包括土壤密度、孔隙度、颗粒组成等物理特征参数和土壤初始盐分组成。按照上述参数进行压实回填,土壤属于粗粒组中的砂土(表 1)。供试的海水和地下淡水分别取自填海区周边海域和地下水井,其化学性质见表 2。

2 结果与分析

2.1 潜水蒸发阶段

从含水量监测值来看,填埋结束后填土的体积

表 1 土槽中压实填土的物理性质

土壤类型	密度 (g·cm ⁻³)	孔隙度 (%)	含水率 (%)	持水能力 (%)	渗透系数 (cm·s ⁻¹)	粒径分布 (%)				
						细粒	细砂	中砂	粗砂 砾石	
填土	1.77	35.4	7.8	21.1	3.68 × 10 ⁻³	14.3	11.1	4.6	30.3	39.7

表2 供试土壤和水体的化学性质

Tab. 2 Chemical properties of test soil and water

类型	pH	总盐 /(g·kg ⁻¹)	离子浓度/(g·kg ⁻¹)						
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
淡水	8.09	0.53	0.02	0.13	0.02	0.04	0.02	0.25	0.04
海水	7.33	29.77	0.03	16.64	0.22	0.37	1.20	10.21	1.10
填土	7.46	1.07	0.03	0.05	0.18	0.59	0.09	0.13	0.01

含水量平均值为 12.4%。1 个月后, 达到最大值 17.3%。之后, 含水量逐渐下降, 9 个月后基本恢复至初始状态(图 2)。取样分析结果显示, 填土的质量含水量初始值为 7.8%。潜水蒸发阶段结束后,

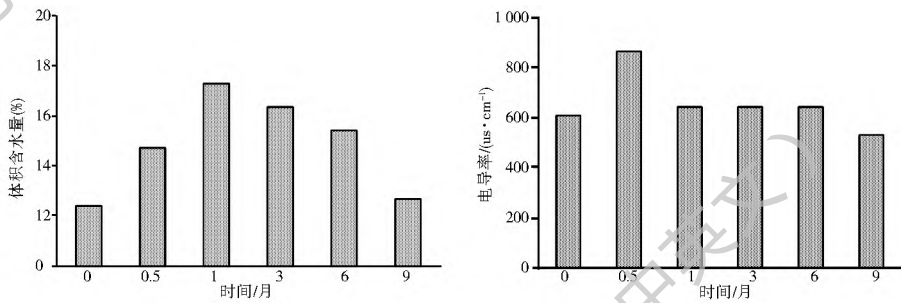


图2 潜水蒸发阶段土壤含水量及电导率的变化

Fig. 2 Variation of soil moisture and conductivity during the phreatic evaporation period

随着盐分移动和含水量的变化, 整个土层的积盐现象严重。从表 3 可以看出, 土体平均含盐量增加了 3.39 g/kg。其中, 表层涨幅最大达到 7.69 g/kg。表层含盐量整体高于底层, 咸水侧整体高于淡水侧, 说明盐分补给越充足, 填土积盐过程越明显。对比阴阳离子的垂向分布, 发现初期 Ca²⁺ 和 Cl⁻ 的表聚现象最为明显, Mg²⁺ 和 Na⁺ 亦向表层聚积但增量不明显。次层以下的 Ca²⁺ 增量显著减少, Na⁺ 增量从上至下逐层递增。从水平分布来看, 土槽中部的 Ca²⁺ 和含量偏高, Mg²⁺ 表现出亲海特性。下层以钠盐为主, 且越靠近咸水侧, 钠盐含量越高。因此, 表层土壤中的盐分以 CaCl₂ 和 CaSO₄ 为主, 下层盐分则以 NaCl 为主, 少量镁盐存在于咸水侧表层土壤中。因而, 在海水环境下水分持续蒸发, 抛土填海区的土壤将形成以 Ca²⁺ 和 Na⁺ 为主的两个离子基团。不仅如此, pH 值的分布也具有偏向性, 且存在明显的增减分界线。越靠近土槽淡水侧, 表层降幅越大; 反之, 越靠近咸水侧, 底层涨幅越大。

2.2 稳定渗透阶段

渗流阶段开始时, 平均供水速率为 2 953 mL/h, 其随着土壤含水量的上升而快速下降。54 h 后, 供水速率下降到 173.8 mL/h, 之后基本稳定在 147.6

含水量从下至上逐层递减。其中, 表层含水量为 15.3%, 底层平均含水量为 21.1% (表 3)。表层和次层的含水量水平分布差别不大, 中层以下咸水侧含水量略高于淡水侧。这说明, 填埋过程中毛细吸水作用是含水量上升的主要驱动因素。随着土壤基质势的降低, 土壤含水量上升速度减缓。当地表体积含水量降至 3% 附近时, 土壤含水量受基质势的影响将不再降低。在持续蒸发作用下, 开始时表层土壤含水量较低, 实际蒸发量较少。随着表层含水量的增加, 实际蒸发能力提升, 导致土槽整体含水量降低。咸水侧含水量相对淡水侧要高, 说明海水对土体含水量有所补充。

mL/h。供水 22 h 后, 土槽末端开始有咸水渗出, 36 h 后渗透速率小幅波动于 146.8 mL/h 上下, 此时土槽整体的蓄水量达到稳定, 进入稳定渗流阶段。表层浸润线在供水 61 h 后到达咸水侧挡板, 因而水平渗透系数范围为 4.55 × 10⁻⁴ cm/s 至 1.36 × 10⁻³ cm/s。供水开始时, 土壤含水量低、基质势较大, 吸水速率快。随着含水量的升高, 土壤吸水速率减缓, 土壤从主动吸水转变为自由水运移, 在稳定的水力坡降下自由水的运移速率也相对稳定。

盐分的供给速率随着供水量的减少而减缓, 并最终稳定在 0.05 g/h。初始渗出液的矿化度为 35 g/kg 左右, 持续供水后渗出液的矿化度降低, 54 h 后基本稳定为 7 g/kg。由图 3(d) 可知, 22 h 以前土体总含盐量上升, 36 h 后含盐量下降速率减缓, 60 h 后平均在 1.2 g/h。从电导率监测数据可知, 在 22~48 h 之间确实存在含盐量降低的过程。经分析可知, 22 h 以前渗出液未流出, 供水所携带的盐分导致土壤含盐量的上升, 故该阶段的盐分上升速率受供水限制。渗出液流出后, 土体盐分整体减少, 其矿化度稳定时间迟滞与渗透速率, 说明盐锋位于湿润锋之后。

当湿润锋进入土槽并向右推移, 3 h 后 B 点下层含盐量快速上升。之后, 湿润锋底部停滞向上抬升直至地表。6h 以后, 湿润锋继续移动, 高盐区范

表 3 蒸发阶段结束时土壤含水量、含盐量及 pH 值

Tab. 3 Soil moisture, salt content, and pH at the end of evaporation period

点位	层位	质量含水量 (%)	pH	总盐 / (g · kg ⁻¹)	离子浓度 / (g · kg ⁻¹)						
					HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
A	表层	15.9	6.85	4.01	0.03	1.10	0.17	2.37	0.23	0.09	0.03
	次层	16.7	7.17	1.52	0.03	0.43	0.08	0.75	0.10	0.11	0.02
	中层	16.6	7.26	1.76	0.02	0.47	0.06	0.77	0.10	0.31	0.02
	下层	18.1	7.34	2.22	0.03	0.53	0.09	0.77	0.10	0.69	0.02
	底层	21.7	7.45	2.76	0.03	0.58	0.11	0.64	0.15	1.24	0.02
B	表层	14.8	7.16	6.54	0.03	0.94	0.36	4.61	0.42	0.14	0.03
	次层	16.6	7.42	1.43	0.03	0.43	0.10	0.69	0.08	0.08	0.02
	中层	16.1	7.43	1.51	0.03	0.34	0.08	0.75	0.08	0.22	0.02
	下层	16.7	7.43	1.67	0.03	0.44	0.10	0.64	0.10	0.33	0.02
	底层	19.0	7.49	2.57	0.03	0.60	0.09	0.64	0.15	1.05	0.01
C	表层	14.4	7.40	6.82	0.03	1.45	0.27	3.95	0.44	0.53	0.16
	次层	16.2	7.41	2.30	0.03	0.75	0.10	1.09	0.11	0.19	0.03
	中层	16.4	7.41	2.22	0.03	0.56	0.10	0.96	0.15	0.41	0.02
	下层	16.9	7.47	2.44	0.03	0.54	0.10	0.83	0.13	0.79	0.02
	底层	21.2	7.47	2.91	0.03	0.55	0.10	0.83	0.15	1.24	0.02
D	表层	15.6	7.30	7.07	0.03	1.21	0.30	4.19	0.54	0.69	0.12
	次层	16.7	7.39	2.60	0.03	0.50	0.12	1.28	0.08	0.57	0.02
	中层	17.5	7.42	2.73	0.03	0.48	0.13	1.12	0.10	0.85	0.02
	下层	19.0	7.39	3.05	0.03	0.51	0.14	1.12	0.15	1.08	0.02
	底层	20.1	7.47	3.34	0.03	0.53	0.12	1.01	0.11	1.52	0.02
E	表层	16.0	7.43	8.76	0.04	1.41	0.01	4.91	0.99	1.30	0.10
	次层	16.7	7.54	3.26	0.04	0.63	0.12	0.56	0.59	1.30	0.03
	中层	18.2	7.60	3.16	0.04	0.56	0.12	0.21	0.37	1.83	0.02
	下层	18.9	7.66	3.46	0.04	0.57	0.12	0.32	0.18	2.22	0.02
	底层	23.7	7.67	4.55	0.04	0.80	0.11	0.48	0.23	2.69	0.20

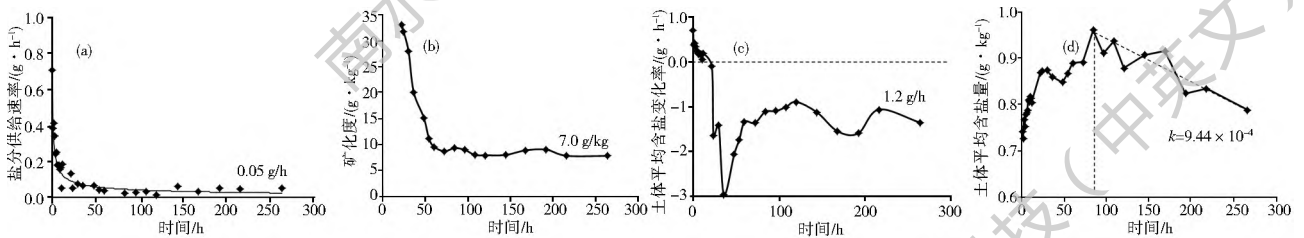


图 3 土壤含盐量变化及盐分补给、淋盐速率

Fig. 3 Variation of soil salt content, salt supply, and desalination velocity

围逐渐扩大并形成盐峰。同时, A 点中层形成低盐区并逐渐扩大。22 h 后, 自由水面线 ($\theta = 22\%$) 到达咸水侧挡板并开始有渗流产生。随着水面线向上抬升, 上层土壤的电导率也开始增加。48 h 后, 最表层土壤的电导率开始上升, 自由水面线下端基本稳定在中层处, 形成相对稳定的状态。72 h 后, E 点表层逐渐形成高盐区, 含盐量接近 16 g/kg, 与逐渐扩大的低盐区形成犄角之势(表 4)。图 4 显

示绝大部分区域的含水量在渗流阶段结束时维持在 25% ~ 32% 之间, 说明此时土壤中已形成的稳定供水状态。湿润锋稳定后, 锋面以下部分的土壤盐分进入稳定下降状态, 而锋面以上部分含盐量变化不大, 自由水面线所在位置的含盐量在 3 ~ 4 g/kg 左右。由于大部分区域的含盐量处于 1 ~ 2 g/kg 之间, 但供试淡水盐度为 1.07 g/kg, 故土槽中的脱盐过程还将持续。

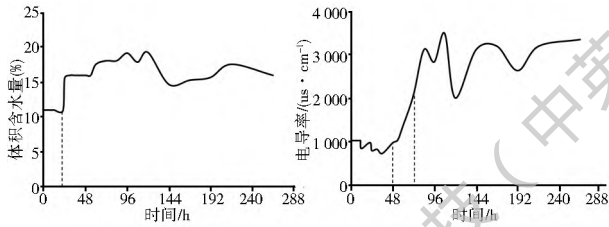


图4 渗流阶段E点表层土壤的含水量和电导率变化过程

Fig. 4 Variation of water content and conductivity of surface soil (point E) during the seepage process

渗流阶段结束后,大部分区域的 Ca^{2+} 含量在 0.5 g/kg 以下, D 点表层浓度达到 8.0 g/kg 。饱和带的 Mg^{2+} 浓度在 0.2 g/kg 以下, 主要集中在分布在 C 点

和 E 点表层。 Na^+ 主要集中在土槽咸水侧, E 点表层含量达到 2.5 g/kg 。因此, 渗透阶段表层聚集的阳离子以 Ca^{2+} 为主, Na^+ 次之。土槽咸水侧表层为 Cl^- 的集中区, E 点表层的浓度涨幅达到 2.4 g/kg 。中部土层的 Cl^- 含量为 $0.6\sim 0.8\text{ g/kg}$, 淡水侧底层含量最低, 为 0.5 g/kg 左右。底层和淡水侧表层的 Cl^- 浓度趋于下降, 最大降幅为 0.3 g/kg , 大部分区域的 Cl^- 涨幅在 0.2 g/kg 以内。离子集中咸水侧表层和中部, B 点中层和 E 点表层的浓度涨幅分别为 0.4 g/kg 和 1.0 g/kg 。因此, 渗流阶段土层中的阴离子运移以 Cl^- 为主, 次之; 故积盐类型也以 $CaCl_2$ 为主, 硫酸盐为辅。

表4 渗透阶段结束时土壤含水量、含盐量及 pH 值

Tab. 4 Soil moisture, salt content, and pH at the end of seepage period

点位	层位	质量含水量 (%)	pH	总盐 / ($g \cdot kg^{-1}$)	离子浓度 / ($g \cdot kg^{-1}$)						
					HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
A	表层	29.8	7.54	1.71	0.04	1.05	0.06	0.37	0.07	0.09	0.03
	次层	27.8	7.72	0.93	0.04	0.57	0.06	0.16	0.03	0.06	0.01
	中层	29.2	7.69	0.91	0.04	0.59	0.04	0.13	0.02	0.08	0.01
	下层	30.3	7.72	1.19	0.04	0.83	0.06	0.08	0.03	0.14	0.01
	底层	24.8	7.75	1.33	0.04	0.48	0.06	0.13	0.02	0.60	0.01
B	表层	25.9	7.37	2.05	0.04	0.65	0.19	0.99	0.11	0.06	0.02
	次层	26.1	7.64	1.18	0.04	0.85	0.05	0.13	0.07	0.03	0.01
	中层	29.5	7.71	1.13	0.04	0.82	0.04	0.11	0.02	0.09	0.01
	下层	29.5	8.09	1.14	0.04	0.74	0.04	0.08	0.02	0.21	0.01
	底层	35.4	8.24	1.13	0.04	0.44	0.06	0.05	0.03	0.50	0.01
C	表层	24.3	7.15	5.22	0.03	1.05	0.23	1.15	2.49	0.21	0.07
	次层	25.8	7.45	0.97	0.04	0.52	0.08	0.21	0.02	0.09	0.02
	中层	30.1	7.67	1.37	0.04	0.71	0.04	0.11	0.02	0.42	0.03
	下层	30.7	8.02	1.27	0.05	0.76	0.06	0.05	0.03	0.31	0.01
	底层	24.6	7.53	1.77	0.03	0.43	0.08	0.08	0.16	0.97	0.02
D	表层	24.2	7.21	11.63	0.03	1.67	0.28	8.29	0.44	0.81	0.11
	次层	26.6	7.28	2.48	0.04	0.70	0.09	1.23	0.13	0.28	0.02
	中层	44.7	7.43	1.45	0.04	0.55	0.08	0.51	0.00	0.26	0.02
	下层	28.3	7.76	1.27	0.05	0.74	0.02	0.03	0.07	0.36	0.01
	底层	24.2	7.46	2.63	0.03	0.58	0.11	0.13	0.31	1.45	0.02
E	表层	20.3	7.22	15.92	0.04	2.48	0.46	5.92	4.28	2.61	0.12
	次层	24.7	7.35	4.39	0.04	0.69	0.19	1.47	0.20	1.79	0.02
	中层	27.1	7.32	2.86	0.04	0.69	0.08	0.85	0.15	1.04	0.02
	下层	29.5	7.78	1.55	0.04	0.65	0.04	0.13	0.03	0.63	0.02
	底层	26.5	7.70	2.34	0.04	0.54	0.04	0.16	0.10	1.44	0.02

3 讨论

3.1 盐分迁移过程分析

在土质条件相对稳定的填海造陆区, 旱季降雨

量少, 蒸发持续时间长, 表层土壤含水量和地下水位成为限制土壤表层积盐的重要因素。从盐分离子组分分析可知, 表层土壤中初始积盐类型为 $CaSO_4$ 。蒸发阶段结束后咸水侧盐分类型变为 $CaCl_2$ 。经调

查,大连地区表层土壤中的盐分以 CaSO_4 为主。在持续蒸发作用下,这部分盐分向表层积盐成为初始积盐。旱季陆相地下水补给较少,填海区淡咸水界面向陆地侧推移,地下水中的盐分类型以 NaCl 和 MgSO_4 为主。当地下水位进入极限蒸发深度以内, Cl^- 快速向上迁移,积盐类型逐步转变为 CaCl_2 。随着 Na^+ 和 Mg^{2+} 的持续补充,土壤中的盐分类型将逐渐向 NaCl 转变。

在稳定渗流阶段,模拟了填海造陆区在陆相地下水补充时的土壤水盐运移过程。由试验可知,当雨季陆相地下水位抬升后,填土中将形成稳定的湿润锋向海岸推移,盐锋紧随湿润锋移动。当地下水遇到阻挡时,如遇到土壤质地相对细密的黏土层,或者建筑基础密集的区域,地下水位将向上抬升直至形成稳定渗流。在此过程中,盐分也随着地下水位的抬升向表层聚集形成土壤盐渍化,土体中的盐分将经历再分布过程。试验结果表明,在陆相地下水的补给下, CaCl_2 和 MgSO_4 成为咸水侧表层最主要盐分类型,底层盐分则以 NaCl 为主。所以,当填海造陆区存在挡水层或建筑物地下基础较为密集时,需要对其周边表层土壤含盐量进行监测。一方面,建筑物周边需要修建绿化带,而土壤含盐量高将直接导致植物死亡。另一方面,如果建筑物周边土壤积盐严重,降雨时建筑物基础将处于咸水环境中,对建筑物的稳定性造成威胁。

3.2 含水量与电导率的关系

已有研究表明,土壤水的电导率与土壤含盐量呈线性关系,故可作为土壤含盐量的表征指标。对比电导率与体积含水量、含盐量与质量含水量之间的关系,可以发现含盐量随着含水量的降低而升高而升高(图 5)。但是,部分点位的电导率随着体积含水量的降低而降低。监测结果也显示,潜水蒸发阶段结束时部分点位的土壤水电导率低于初始状态,但采样分析时测得的含盐量却高于初始含盐量。这意味着当含水量较低时,使用电导率作为含盐量的表征指标可能失真。已有研究中,孙玉龙等认为土壤毛细水的不连续性可能造成电导率测量值的下降^[19]。另外,土壤中的盐分可能因浓度过高而结晶析出,以晶体形式存在的盐分不能够通过电导率测试而测得,但在取样分析时会溶解于蒸馏水而测出。因而,当少量降雨或灌溉植物初期,会导致高矿化土壤水布满根区,植物从干旱胁迫转边为盐分胁迫^[20]。在旱季灌溉必须确保足够水量才能压盐,否则将适得其反。

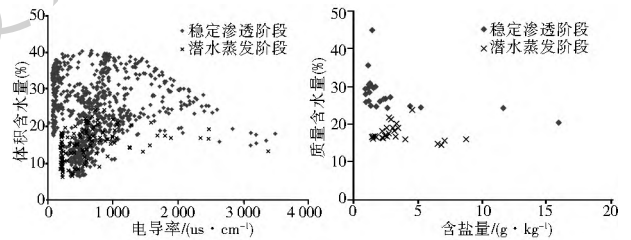


图 5 土壤含水量与电导率、含盐量的关系

Fig. 5 Relationships between soil moisture and conductivity or salt content

3.3 含盐量与酸碱度的关系

在盐分运移过程中,土壤的酸碱环境也相应发生改变。但是,整体范围在 6.5~9.0 之间,增量在 1.0 以内(图 6)。在潜水蒸发阶段,土壤酸碱度随着含盐量的增加整体表现为先下降后上升的趋势。当含盐量增量为 3 g/L 左右时, pH 值最低为 6.85。在稳定渗流阶段,自由水面线以下的土壤 pH 值上升,说明通过淡水淋洗盐渍土将导致土壤 pH 值上升,与陈巍等人的研究成果相一致^[21]。自由水面线以上含盐量整体增加,土壤 pH 值下降。因而,无论是在蒸发还是渗流过程中,土壤酸碱度的变化始终受盐分分布格局的影响。针对淋洗过程中诱发土壤 pH 值上升的原因,殷仪华^[22]等认为土壤 pH 值应决定于的含量,土壤中 CaCO_3 的溶解可增加的含量,但增加量的多少则受溶液中 Ca^{2+} 浓度控制。当盐溶液浓度降低、 Ca^{2+} 含量减少时,含量就增加得多,从而土壤 pH 值也相应增加。除此之外,王丽娜^[23]等对保护地多次淋洗状况进行分析,认为土壤 pH 值和 Ca^{2+} 、 Na^+ 等盐基离子在全盐中的相对比例有关、等酸根离子的累积及 Ca^{2+} 、 Na^+ 等碱基离子的下降是导致土壤 pH 值上升的重要因素。

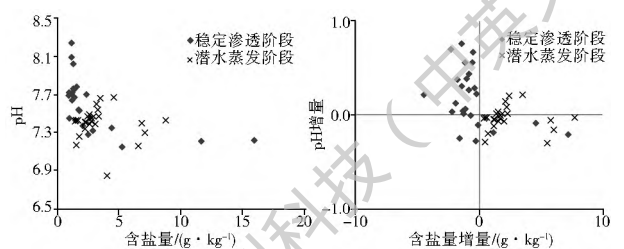


图 6 土壤酸碱度与含盐量的关系

Fig. 6 Relationship between soil pH and salt content

4 结论

填海造陆区的上层填土不仅面临着降雨和蒸发的双重作用,还会受到地下径流的影响而迁移。在潜水蒸发作用下,下层的盐分持续向上补给导致表层积盐,初始积盐类型为 CaSO_4 。随着海水对土层盐分的补给,积盐类型逐步转变为 CaCl_2 型并最终

向 NaCl 过渡。当陆相地下水进入填土区, 将形成湿润锋向海岸推移并达到相对稳定的渗流状态。自由水面线以上为积盐状态, 盐分类型以 CaCl_2 和 MgSO_4 为主; 自由水面线以下为脱盐状态, 盐分类型以 CaCl_2 和 NaCl 为主。当土壤含水量较低时, 使用电导率表征含盐量可能导致测量值偏低, 毛细水的不连续性和土壤盐分结晶析出可能是主要原因。土壤水盐运移将改变酸碱度环境, 随着含盐量的增加 pH 值将先下降后略微上升。在陆相地下水补给条件下, 填海造陆区的盐渍化防治工作应当重点关注地下存在挡水层或建筑物基础较为密集的地区。

参考文献 (References):

- [1] 高志强, 刘向阳, 宁吉才, 等. 基于遥感的近 30a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析 [J]. 2014, 30 (12): 140-147. (GAO Zhi qiang, LIU Xiang yang, NING Ji cai, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30 year satellite data in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (12): 140-147. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.12.017
- [2] 宋红丽, 刘兴土. 围填海活动对我国河口三角洲湿地的影响 [J]. 湿地科学, 2013(2): 297-304. (SONG Hong li, LIU Xing tu. Effect of reclamation activities on wetlands in estuarine delta in China [J]. Wetland Science, 2013(2): 297-304. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-5948.2013.02.024
- [3] Chen K P, Jiao J J. Seawater intrusion and aquifer freshening near reclaimed coastal area of Shenzhen, China [J]. Water Science and Technology, 2007, 7(2): 137-145. DOI: 10.2166/w.s.2007.048
- [4] Iost S, Landgraf D, Makesch F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China [J]. Geoderma, 2007, 142(3-4): 245-250. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.08.001
- [5] Gomez E, Durillon C, Rofes G, et al. Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O_2 and loading influence [J]. Water Research, 1999, 33(10): 2437-2447. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00468-0
- [6] 姜翠玲, 裴海峰. 北塘水库底泥盐分释放的影响因子研究 [J]. 环境科学与技术, 2007(10): 144, 115. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Study on impact factors of sediment salinity release in Beitang Reservoir [J]. Environmental Science and Technology, 2007(10): 144, 115. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2007.10.001
- [7] 李海明, 陈健健, 李银, 等. 北大港水库水-土界面盐分释放规律 [J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 47-50. (LI Hai ming, CHEN Jian jian, LI Yin, et al. Law of salt release at soil-water interface in Beidagang Reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 47-50. (in Chinese)) DOI: 1672-1683 (2014)03-0047-04
- [8] 叶清华, 李煜, 王文, 等. 底泥盐分释放影响下的滨海水库水体盐度变化过程数值模拟 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2015 (6): 518-523. (YE Qing-hua, LI Yu, WANG Wen, et al. Numerical simulation of water salinity change process in coastal reservoir influences by sediment salt release [J]. Journal of Hohai University, 2015 (6): 518-523. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.003
- [9] 王娟. 河口海湾水库底质盐分释放对蓄水咸化的影响及防控措施 [D]. 青岛: 青岛大学, 2011. (WANG Juan. Effect of salt release from the sediment in a polder reservoir on water salinity and control measures [D]. Qingdao: Qingdao University, 2011. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y2043144
- [10] 高增文, 郑西来, 赵全升. 扩散边界层对沉积物盐分释放的阻滞影响 [J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 255-260. (GAO Zeng wen, ZHENG Xi lai, ZHAO Quan sheng. Diffusive boundary layer and its resistance on salt release from deposited sediments in a polder reservoir [J]. Advance in Water Science, 2010, 21(2): 255-260. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.02.009
- [11] 张效龙, 朱鸣鹤, 郑西来. 环境因素影响下海湾蓄淡水水库底泥盐分释放试验研究 [J]. 海洋通报, 2010(2): 135-142. (ZHANG Xiao long, ZHU Ming he, ZHENG Xi lai. Test investigation for salt release from sediments in a polder reservoir under effects of environmental factors [J]. Marine Science Bulletin, 2010(2): 135-142. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2010.02.003
- [12] 张华, 周训, 沈晔, 等. 广西北海市地下水系统水化学特征的分析 [J]. 现代地质, 2007(4): 613-618. (ZHANG Hua, ZHOU Xun, SHEN Ye, et al. Analyses of hydrochemical characteristics of the groundwater system in Beihai, Guangxi [J]. Geoscience, 2007(4): 613-618. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-8527.2007.04.004
- [13] 乔吉果, 龙江平, 许冬, 等. 长江口北翼海滨地区海水入侵的地球化学特征初步研究 [J]. 海洋通报, 2011(2): 200-205. (QIAO Ji guo, LONG Jiang ping, XU Dong, et al. Preliminary study in geochemical characteristics of seawater intrusion in the coastal region north wing of the Yangtze River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2011(2): 200-205. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2011.02.012
- [14] 王颖, 郭世花. 湖泊底泥中磷释放的随机动力学模型 [J]. 水利学报, 2003(11): 71-77, 84. (WANG Ying, GUO Shi hua. Kinetic model for simulating phosphorus released from the sediment of lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(11): 71-77, 84. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2003.11.012
- [15] 杜佳鑫, 杜华超, 王连峰. 辽东湾河口潮间带沉积物及附近土壤硝化和反硝化强度研究 [J]. 环境保护科学, 2015(5): 123-127. (DU Jia xin, DU Hua chao, WANG Lian feng. Nitrification and denitrification potentials of intertidal sediments and the nearby soils in Liaodong Bay Estuaries [J]. Environmental Protection Science, 2015(5): 123-127. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6216.2015.05.023
- [16] 向军, 彭进平, 逢勇, 等. 鉴江河口底泥盐度释放规律研究 [J].

- 水文, 2008, 28(4): 12-15. (XIANG Jun, PENG Jir ping, PANG Yong, et al. Study on sediment salinity release in estuaries and loughs[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 12-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.04.004
- [17] 刘莹, 肖树芳, 王清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2004(4): 518-521, 528. (LIU Ying, XIAO Shu fang, WANG Qing. Research on indoor scale down test of dredger fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(4): 518-521, 528. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.04.003
- [18] 詹良通, 童军, 徐洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究[J]. 水利学报, 2008(2): 201-205. (ZHAN Liang tong, TONG Jun, XU Jie. Laboratory study on self weight sedimentation and consolidation behaviors of hydraulic dredged mud[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(2): 201-205. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.02.012
- [19] 孙玉龙, 郝振纯, 陈启慧, 等. 土壤电导率及土壤溶液电导率与土壤水分之间关系[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 69-73. (SUN Yur long, HAO Zhen chun, CHEN Qi hui, et al. Relationship among ionic strength and electrical conductivity of soil solution and soil bulk conductivity[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(6): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-1980.1997.06.014
- [20] 李金玲. 盐分对土壤饱和导水率影响的实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006. (LI Jir ling. Effect of salinity on hydraulic conductivity in saturated soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y938869
- [21] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 521-528. (CHEN Wei, CHEN Bang ben, SHEN Qi rong. Studies on the changes of pH value and alkalization of heavily saline soil in seabeach during its desalting process[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 521-528. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2000.04.012
- [22] 殷仪华, 陈邦本. 江苏省滨海盐土脱盐过程 pH 值上升原因的探讨[J]. 土壤通报, 1991, 22(1): 5-7. (YIN Yi hua, CHEN Bang ben. Discussion on the causes of rising pH value during the desalination process of coastal saline soil in Jiangsu Province[J]. Journal of Soil Science, 1991, 22(1): 5-7. (in Chinese))
- [23] 王丽娜, 张玉龙, 范庆锋, 等. 淋洗状态下保护地土壤 pH 与盐分含量及其组成关系的研究[J]. 节水灌溉, 2009(9): 8-11. (WANG Li na, ZHANG Yur long, FAN Qing feng, et al. Study on relationship between pH value of protected field soil and its salinity content and composition under leach condition[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 8-11. (in Chinese)) DOI: 1007-4929(2009)06-0008-04

(上接第 94 页)

- [21] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线工程不同调水方案下的汉江水华发生概率计算模型[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 727-732. (XIE Ping, DOU Ming, XIA Jun. Water bloom occurrence probability calculation model in Hanjiang River under different water transfer schemes of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 727-732. (in Chinese))
- [22] 刘威, 彭文启, 冯健, 等. 针对小江回水区水华现象的生态调度方案评估[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 79-8287. (LIU Wei, PENG Wen qi, FENG Jian, et al. Assessment on ecological operation scheme for algal bloom in backwater area of Xiaojiang river [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 79-8287. (in Chinese))
- [23] Murphy K P. Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning [D]. Doctor, Berkeley: University of California, 2002.
- [24] 郭艳军, 叶鹰. 主成分分析在确定贝叶斯网络参数中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2009, 24(1): 71-73. (GUO Yarr jun, YE Ying. Using principal component analysis to calculate parameter in Bayesian Networks [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2009, 24(1): 71-73. (in Chinese))
- [25] 殷大聪, 黄薇, 吴兴华, 等. 汉江水华硅藻生物学特性初步研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 6-10. (YIN Da cong, HUANG Wei, WU Xing-hua, et al. Preliminary study on biological characteristics of spring diatom bloom in the Hanjiang river [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 6-10. (in Chinese))