

秦陵百戏俑坑土遗址纵向水盐运移的 模拟土柱实验研究

张 丹¹, 张尚欣², 夏 寅², 张建国³, 孙志超², 付倩丽², 胡道道¹

(1. 陕西师范大学, 陕西西安 710062; 2. 陶质彩绘文物保护国家文物局重点科研基地, 秦始皇帝陵博物院, 陕西临潼 710600; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 风化盐析是影响土遗址最为严重的病害之一。了解不同深度处土遗址可溶盐的含量以及变化规律可为土遗址的盐析病害提供理论依据和技术支撑。为此, 本实验采用有机玻璃土柱装置和应用 EM50 传感器探头监测土柱不同深度处的含水率、电导率的变化规律, 并结合实验室分析测定了不同时间土柱表面的含盐种类以及含盐量、不同深度处的含盐量等。结果表明, 不同深度处土样的含水率越小电导率越大, 且土壤表面的含水率最小, 电导率最大; 利用离子色谱法测定结果表明, 除 K^+ 之外, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的含量随深度的变化趋势与含盐量随深度的变化趋势一致。本研究可为土遗址盐析病害的防治提供理论参考。

关键词: 土柱; 可溶盐运移; 盐分含量

中图分类号: K878; X833 **文献标识码:** A

0 引言

土遗址是指以土作为主要建筑材料的人类历史上生产、生活等各种活动遗留下来的遗迹, 是一种重要的文物资源^[1]。导致土遗址破坏的地质及自然环境因素主要有两种, 其一为内动力作用; 二为外动力作用, 主要有风、雨、温湿度变化、地下水和可溶盐的运移等。目前气候对土遗址的影响研究很多, 病害机理的研究成为焦点^[2~6], 但是忽略了因地下水埋深不同引起的可溶盐运移对土遗址病害机理方面的研究。鉴于土遗址保护的最小干预原则, 主要采用实验室模拟探究潜水模式下可溶盐运移对其的破坏机理。

土壤水盐运移规律是土壤物理学、农田灌溉学等领域的重要研究方向, 也是盐碱地治理、盐渍土改良的核心问题^[7], 同时也是指导覆膜种植技术、防止地下水污染的重要研究方面。很多学者在水盐运移进行了深入研究并取得了丰硕的研究成果。罗焕炎^[8]、吕殿青^[9]和史文娟^[10]等用土柱装置从理论和实验方面研究了水盐运移的有关规律, Gardner (1957) 和 Bresler (1967)^[11] 分别研究了淋洗过程中的盐分运移和灌溉过程中盐分移动的数学模型。水盐运移研究主要分为两个方面, 室外研究和室内研

究。而对于室内研究, 选择一种最符合室外环境的实验装置很重要, 经过多年的发展研究, 目前更多领域的学者采用有机玻璃土柱进行水盐运移模拟研究^[12~14]。

关于水盐运移规律的研究主要集中于农业研究等领域, 而在文物保护领域的应用鲜有报道, 尤其是在土遗址保护方面。由盐分的运移、结晶等作用, 使可溶盐从土体中析出, 轻则出现泛白, 重则产生风化破坏作用, 引起裂隙、裂缝等病害。

本研究应用有机玻璃土柱装置, 模拟潜水模式下土遗址的水盐运移, 通过 EM50 土壤热盐监测系统测定不同深度处的电导率、含水率等参数, 研究不同深度处的水盐运移规律。土遗址中可溶盐主要由可溶性无机离子组成, 含有的无机离子不同, 形成可溶盐的类型不同, 对土遗址产生的危害也不同。所以了解土遗址中无机离子的运动规律, 可为土遗址盐析病害的防治提供理论依据。

1 实验与方法

1.1 实验装置

如图 1 所示, 有机玻璃土柱装置直径 40cm, 高 200cm (夯土高度 180cm) (分为三段, 中间采用法兰

收稿日期: 2014-01-28; 修回日期: 2014-06-01

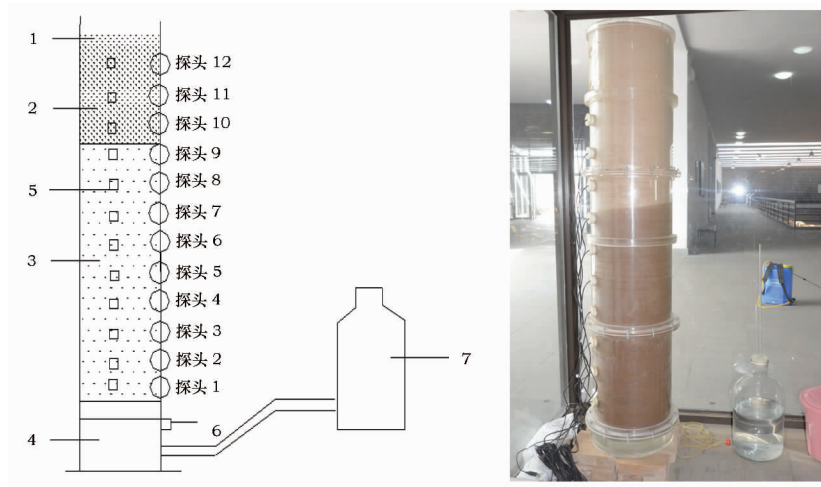
基金项目: 国家科技部支撑计划资助 (2012BAK14B02)

作者简介: 张 丹 (1990—), 女, 现就读于陕西师范大学材料科学与工程学院材料工程专业, E-mail: nideyujitiankong@163.com

通讯作者: 夏 寅, 副研究馆员, E-mail: xiayin2000@hotmail.com

和橡胶垫连接,上下两段各 70cm,中间段 60cm)。柱身纵向共设有 12 个直径 5cm 的圆孔,孔中心间距 150cm。土柱下端有直径 4cm 的进水口,距下表面 10cm 设有有孔筛板,最底层与有孔筛板之间为蓄水区。马氏瓶下端设有排水孔,上面由橡胶塞封口。采用 EM50 传感器测定不同深度处土样含水量

和电导率,共用 2 套传感器,每套传感器带 5 个探头,共计 10 个探头。因为探头数量有限,因此待土柱最下端(160cm 和 175cm)探头处水盐运移平衡之后,将此两处探头挪出、洗净(此时土柱水分运移至顶端约 60cm),后埋设至最上端(10cm 和 25cm)处进行数据测定。



1. 土柱, 2. 模拟夯土, 3. 填土, 4. 蓄水区, 5. 探头, 6. 排气孔, 7. 马氏瓶

图 1 实验示意图(左)和有机玻璃土柱实际装置(右)

Fig. 1 Schematic diagram of device(left); Plexiglas soil column device(right)

1.2 实验土柱装填方法

本实验所用的实验土柱是将秦始皇帝陵百戏俑坑的填土作为供试土壤(供试土样可溶性盐组成、

可溶盐类型及颗粒级配见表 1~3)在有机玻璃土柱装置中夯筑而成。该供试土样经过过筛、风干、去除杂质、采用铁铲大幅度翻动以充分混合等处理。

表 1 供试土壤主要可溶盐离子组成

Table 1 Main Salt ions composition of the soil

(mg/kg)

土壤主要可溶盐离子组成						含盐总量
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	
23.78	2.92	9.45	1.21	8.52	50.82	1210

表 2 供试土壤可溶盐种类和含量

Table 2 Salt type and content of the soil

(mg/kg)

原状土	成盐种类					
	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgCl ₂	MgSO ₄	CaCl ₂	CaSO ₄
盐分含量	14.04	5.90	—	14.64	—	40.26

表 3 供试土壤的颗粒级配分析

Table 3 Grain size distribution of the soil

颗粒级配/%				土壤质地
1~2mm	0.02~1mm	0.002~0.02mm	<0.002mm	
—	砂粒	粉粒	粘粒	
0.11	73.15	25.77	1.07	砂壤

1.2.1 土柱填装 在土柱装置筛板上铺一层与土柱装置直径相同的筛网(80目),筛网上平铺一层厚度约为2cm的,用高纯水洗涤过的细沙(高纯水由美国LABCONCO公司的Water Pro PS超纯水系统制得,其电导率为0.004dS/m)。

实验中控制容重 $1.69\text{g}/\text{cm}^3$,计算土壤重量,每次称取土样5kg,每次夯筑厚度2.35cm,控制不同深度处土壤容重保持一致,按照此工艺夯筑至距离底端150cm高度。150cm以下模拟的是粗夯,之上模拟细夯。考虑供试土样为干土,夯筑难度大等问题,采取每次称取填土5kg,夯筑厚度为2.3cm,控制容重为 $1.73\text{g}/\text{cm}^3$,直直到土柱顶端,则土柱填装完成(土柱柱身设有直径为5cm的孔,在填土夯筑过程中要先用胶带将孔密封,防止土从孔中漏出)。

1.2.2 探头埋设 土柱柱身纵向共设有12个圆孔供探头埋设,直径均为5cm,孔中心间距150cm。首先用镊子在土柱侧面的观测圆孔中心位置掏出部分干土,挖取深度以确定探头可以完全被土柱掩埋,之后将EM50探头竖直插入圆孔内。插入探头之后用干土将圆孔处封口,并夯实探头周围土壤,在接近圆孔表面时,用湿泥封口(湿泥用去离子水拌匀),再用橡胶塞将圆孔堵住,橡胶塞中间留有细孔,可将与EM50探头相连接的线从中掏出,则探头埋放完成。设定传感器20min进行一次数据记录与采集。

1.2.3 土柱供水 模拟180cm的地下潜水埋深,马氏瓶中存放2/3高度的高纯水,马氏瓶瓶口的橡胶塞中插有玻璃管,伸入水中,使玻璃管的底部与土柱细沙和填土的分界面相平,这样可以控制模拟的地下水位基本保持不变。用乳胶管将连接马氏瓶和土柱下端蓄水层相连,供水,实验开始。

1.3 样品采集与测定

土柱装填好后开始供水,即实验开始。为了研究经过水盐运移之后不同深度处土壤含盐量随深度的变化,需在不同时间、不同深度采集土样。因为土遗址病害主要发生在土遗址表面,所以应更加注重表面土样含盐量的变化,所以表面土样的采集比较密集。具体采样步骤如下:当潜水在土壤毛管力作用下运移至距土柱表面15cm时,每天9:00定时取表面土样0.2cm,直至3.0cm,分别距表层0~0.2cm、0.2~0.4cm、0.4~0.6cm、0.6~0.8cm、0.8~1.0cm、1.0~1.2cm、1.2~1.4cm、1.4~1.6cm、1.6~1.8cm、1.8~2.0cm、2.0~2.2cm、

2.2~2.4cm、2.4~2.6cm、2.6~2.8cm、2.8~3.0cm。待水盐运移稳定后,拆卸土柱,采集不同深度处的土样进行分析,分别距土柱表面3~5cm、5~7cm、7~10cm、10~12cm、12~15cm、15~17cm、17~20cm、20~22cm、22~25cm、25~27cm、27~30cm、30~50cm、50~70cm、70~100cm、100~130cm、130~160cm,共32个样品。

采用DDS-11A电导仪(上海大普仪器有限公司)测定土样浸提液(土水比为1:5)电导率值。RE-52AA旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)。采用质量法测定土壤含盐量。采用ICS-1500(美国戴安公司)进行离子色谱分析。

2 结果与分析

2.1 K9901 陪葬坑概况

2.1.1 K9901 陪葬坑环境及建筑特点 据调查显示,K9901陪葬坑平面整体呈“凸”字型,占地面积约800m²,坑体东西长40m,西向宽度16m,东向宽度12.3m,陪葬坑内设有3条东西方向的过洞,由南向北过洞的宽度分别是3.3m、4m、3.1m,3条过洞之间由两道东西走向的土隔墙隔开,土隔墙宽1m、高2.55m。该陪葬坑的南北两壁分别筑有宽约1.6m,高约2.5m的夯土二层台^[15],如图2所示。



图2 K9901 陪葬坑西拍平面图

Fig.2 The plan on the west of K9901 pit

K9901陪葬坑的坑底采用直接填土夯筑,二层台和两个隔墙采用版筑夯筑形成。在修建陪葬坑之前,预先挖成一个土坑,在土坑底部直接夯筑填土形成夯土地基层。南壁壁面的上部有向坑外倾斜的趋势,在距离坑底约2.5m处紧贴坑壁以版筑技术构筑夯土二层台,发掘时发现,陪葬坑南壁二层台的夯层均匀且清晰,每层厚度约5~7cm(图3)。



图3 南隔墙南侧夯层

Fig.3 The south wall on the south side rammed layer

2.1.2 遗址病害调查 由于K9901陪葬坑在挖掘之前受到填土的保护,处于相对潮湿的环境中,水盐运移达到平衡,但是挖掘之后,突然暴露于较干燥的环境下,原来的水分平衡遭到破坏,使土壤颗粒遭到破坏,所以导致K9901陪葬坑土遗址出现许多病害。经过现场拍照调查,K9901陪葬坑土遗址出现的病害主要有:裂缝、坍塌、盐析、片状剥离、底部淘蚀、粉化等,其中裂缝、坍塌病害图4和5所示。



图4 二层台与坑壁裂缝

Fig.4 The cracks of racking and pit wall cracks



图5 南边过道坍塌病害

Fig.5 The collapsed disease of South aisle

由以上可知,百戏俑坑土遗址已经出现很多病害,严重情况不一,如盐析病害比较轻,但是坍塌、底部淘蚀等已威胁到土遗址的安全稳定性。土遗址的

病害与土遗址表面可溶盐的运动密不可分,而表面的可溶盐是土体中的盐分在水分的携带下运移到达表面。所以,为了探究土遗址病害与水盐之间的关系,更好地保护土遗址,预先进行了以下实验。

2.2 含水量与电导率随深度的变化规律

盐随水动,土遗址中的盐分运移和水分运移密切相关,水分是盐分运移的载体。土壤本身含有盐分,水分溶解土体中的可溶性盐形成盐溶液,在土壤水的运动过程中,盐分随水发生运移^[16]。之前关于水盐运移中含水率的测定方法是采用烘干法^[17],电导率可以准确、快速的定量反映土壤盐分的含量,电导率采用电导法测定^[18]。本实验采用EM50探头直接测定的不同深度处土壤含水率以及电导率。图6和图7采用的是EM50探头测得的不同深度处不同时间的含水率和电导率,由于探头埋深问题,部分探头数据出现误差故作图时已去除。

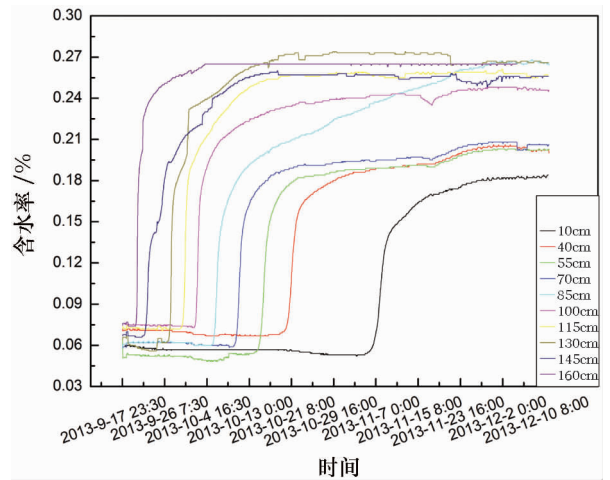


图6 土柱纵向不同深度处土样含水量与时间关系图

Fig.6 The graph between soil column water content of soil samples at longitudinal different depths versus time

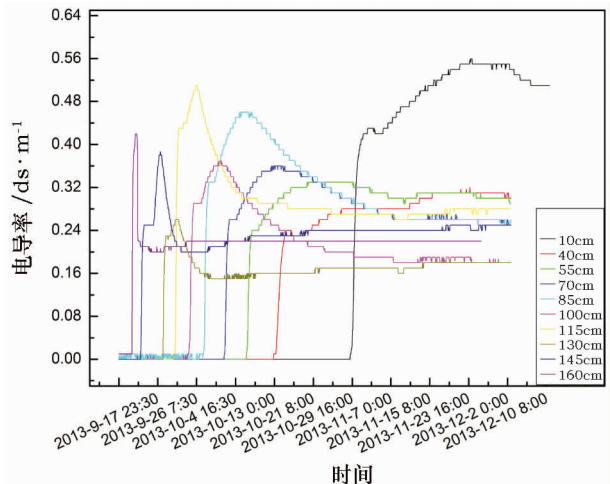


图7 土柱纵向不同深度处土样电导率与时间关系图

Fig.7 The graph between soil column conductivity of soil samples at longitudinal different depths versus time

图 6 和图 7 中采集的电导率和含盐量数据每 20min 采集一次,总计 2000 多个数据。由以上两图可以看出,含水量随时间呈现稳定-急速上升-恒定的变化趋势,电导率呈现稳定-急速上升-迅速下降-恒定的变化趋势;刚开始供水时,毛管水尚未运移至探头处,所以含水率和电导率均基本为零。随着盐溶液在毛管力作用下不断向土柱表面运移至探头时,含水率与电导率均呈急速上升趋势,土柱最下端的探头所测数据经过 35h 之后开始急速上升,越接近土柱表面,探头所测数据开始急速上升经历的时间越长,最表面处探头所测数据经过 1195h 之后开始急速上升。当盐溶液继续运移离开探头,水分上移与补给达到平衡时,含水量保持一定数值基本稳定不变。电导率则出现最大值后逐渐下降,最后保持不变,即此时不存在积盐,也不存在脱盐,只属于盐分的传导区。越接近土柱表层,最大电导率降低跨越时间越长,说明越接近土柱表面可溶性盐分含量越高。由于表面富集盐分比较多,所以表面土壤容易发生各种病害,如表面剥落、粉化等。

从图 6 和图 7 可知距离土柱表面 10cm 处的含水率最低,电导率最高。图 8 为 EM50 探头测得的含水率与电导率达到稳定之后含水率、电导率随采样深度的关系图。从图 8 中可以看出,随着土柱纵向深度的减小,含水量总体呈现降低趋势,最后趋向于 20%,电导率总体呈现不断降低的趋势,含盐量在缓慢增加,最后趋向于 0.50ds/m。说明越接近表面含水率低而含盐量大,主要是由于土壤水分蒸发及干湿交替作用下造成的含水率降低,随着水分不断向上迁移,盐分亦随着水分向遗址表面迁移。由于水分的不断蒸发,盐分在土遗址表面析出进而不断累积。在此过程中,产生盐胀作用,在土遗址空隙

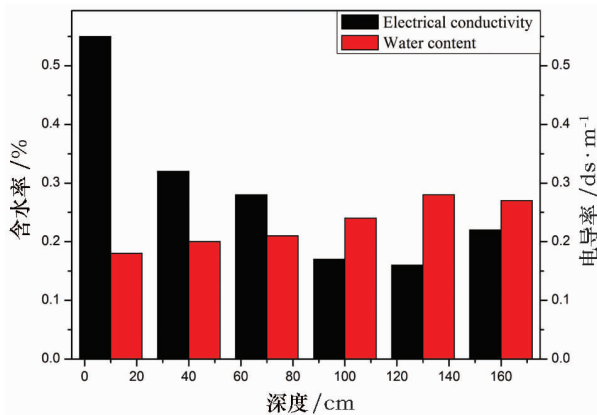


图 8 土柱纵向不同深度处土样电导率、含水率与深度关系图

Fig. 8 The graph between soil column conductivity and water content of soil samples at longitudinal different depths

中形成很大的内应力,导致土壤颗粒之间距离增大,黏结力减小,从而使土遗址表面泛白酥碱,严重时会使表面土层脱落,造成土遗址病害。可见,水分运移对可溶盐的运移影响很大^[17]。

2.3 可溶性盐分的定量分析

虽然土壤的盐分组成比较复杂,但是电导率值与含盐量在一定范围内具有良好的线性关系。实验测得不同深度处 8 个土样的电导率,以及对应不同深度处土样的含盐量,可以得到电导率与含盐量的线性关系(图 9)。由图 9 可知,电导率在 0.076 ~ 0.7ds/m 范围内,电导率与含盐量(g/kg)之间呈现良好的线性关系, $y=0.047x+0.0765$ (y 为土样电导率, x 为土样含盐量),由此方程可计算得到不同深度处土样的可溶盐含量。根据测定采集的不同深度处的 32 个土样(1.3 样品采集与测定)的其电导率,结合上述电导率与含盐量的线性关系,计算不同深度土样的含盐量,其结果如图 10。

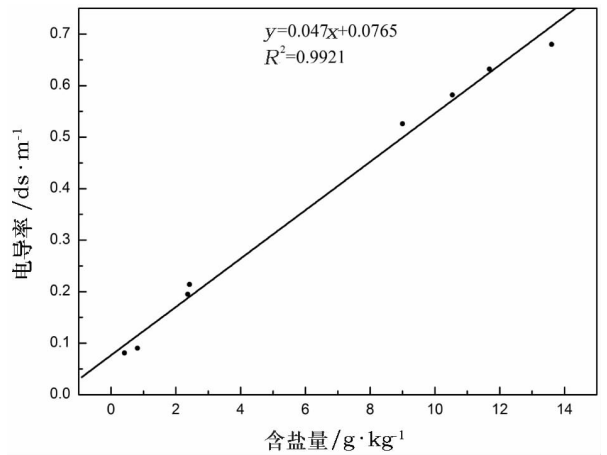


图 9 土样电导率与可溶盐含量的线性图

Fig. 9 The linear of soil conductivity and soluble salt content

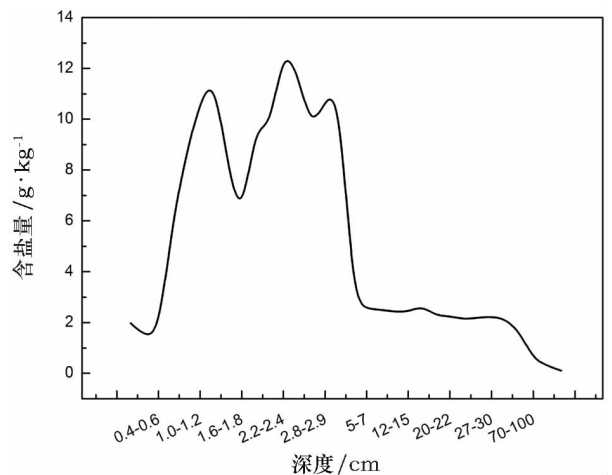


图 10 土柱纵向不同深度含盐量随深度的变化图

Fig. 10 The diagram of soil column soluble salt content of soil samples at longitudinal different depths versus depths

从图 10 初步可知,每天采集土柱表面土壤时,随着时间的延长,盐分不断向上迁移,在表面聚集,所以 0~3.0cm 土样的含盐量呈现不规则的变化趋势,可溶盐最高达到 12.850g/kg。3.0cm 以下土层含盐量明显大于 3.0cm 以上的土壤含盐量,且深度越深,含盐量越低,土柱最低层土壤含盐量仅为 0.110g/kg,远远小于供试土样的含盐量(1.210g/kg)。由此可以看出,当水分沿着毛管向上迁移的过程中,土壤中的可溶盐

亦随着向表面迁移。由此判断出盐分主要集中在 0~3.0cm 范围内。

2.4 可溶性盐离子的运动规律

当水分携带可溶盐在毛管作用下不断向土柱表面迁移的过程中,即形成可溶盐离子向上运动的过程,采用 IC 分析可以明确土壤中可溶性盐离子的迁移类型以及不同深度处离子含量的变化规律。对按照 1.3 所示采集的不同深度处的 32 个土样进行 IC 分析,分析结果如下图 11 所示。

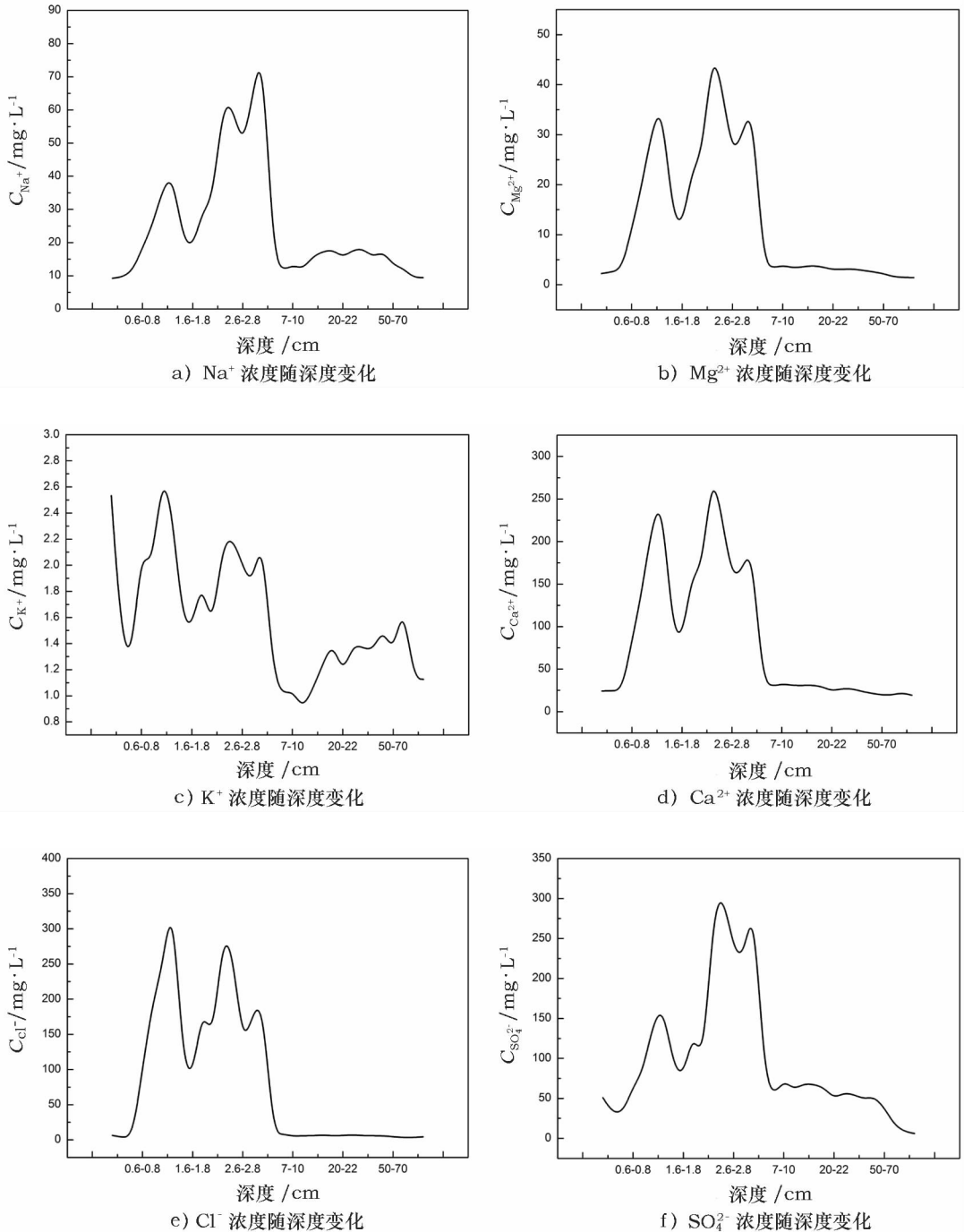


图 11 土柱土样无机盐离子浓度与纵向深度曲线图

Fig. 11 The diagram of inorganic ion concentration of salt samples from soil column versus vertical depth

从图 11 可以看出,不同深度处的土样含有的阳离子主要含有 Ca^{2+} 和 Na^+ ,阴离子主要有 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。 K^+ 除外, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子的含量随深度的变化趋势与含盐量随深度的变化趋势是一致的。且距离土柱表面 3.0cm 以下,随着采样深度的增加,除 K^+ 之外, Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 离子的含量呈逐渐减小的趋势。以 Na^+ 为例,3.0cm 处土样的浓度为 80.020mg/kg,而 3.0~5.0cm 处的浓度突然变为 16.352mg/kg,下降幅度特别大,之后越接近土柱底端, Na^+ 浓度越小,其他离子的浓度随深度均有此变化规律。说明可溶盐离子在毛管水的作用下逐渐从下到上向土遗址表面迁移,最后在一定程度范围内聚集,并且随着外界环境的变化(如环境中温湿度的交替变化),随着毛管水的蒸发而结晶析出,形成病害。图 11(c)中 K^+ 随深度变化迁移的非常小,分析其原因可能是因为 K^+ 所带电荷、离子半径和土壤颗粒静电吸附的影响^[19]。因为 K^+ 的离子结合半径较大,水和作用小,容易被土壤胶体所吸附^[20]。由此可知,可溶盐离子在土遗址中的运移不仅与外界环境的变化,而且也受到所带电荷、离子半径等自身因素的影响。 SO_4^{2-} 受土壤胶体的吸附作用大^[21],所以对比 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的迁移含量可知,3.0cm 以下土层中, SO_4^{2-} 含量远大于 Cl^- 含量。

3 结 论

通过土柱模拟土遗址中水盐运移规律的模拟实验,得出如下结论:

1) 盐水水动,土壤水溶液在毛管力的作用下不断向土遗址表面迁移,不同纵向深度处电导率、含水量随时间的变化趋势保持一致。并且表面土壤的含水率最低,电导率最高,使土遗址表面富集大量盐分,在外界环境的变化刺激下,土遗址最终产生病害。

2) 一定潜水埋深模式下水分携带可溶盐向土遗址表面运移,最终可溶盐主要聚集在土遗址表面 0~3.0cm 土层范围内,在外界环境的交替变化下,盐分在土遗址表面发生溶解-析出-再溶解-再析出的过程,使土壤表面颗粒结构遭到破坏,最终表现为酥碱、淘蚀等病害。所以在治理土遗址盐害时应消除 0~3.0cm 土层范围内的盐分。

3) K^+ 随深度的迁移概率比较弱,可见无机盐离子在土遗址中的运移不仅与外界环境相关,同时也受到所带电荷、离子半径等自身因素的影响。

4) 该模拟土柱水盐运移规律的研究对于土遗址表面可溶盐的消除具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(4): 64.
SUN Man-li. The states and progress of soil and site protection [J]. Sci Conserve Archaeol, 2007, 19(4): 64.
- [2] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
LI Zui-xiong. The ancient ruins of protection of silk road [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [3] 崔凯, 谌文武, 韩文峰, 等. 多元层状陡立土质边坡差异性风蚀效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1414-1421.
CUI Kai, ZHAN Wen-wu, HAN Wen-feng, et al. The research on the effect of slope differences erosion of multivariate layered steep soil [J]. J Geotech Eng, 2009, 31(9): 1414-1421.
- [4] Lewin S Z. The mechanism of masonry decay through crystallization [J]. Conserv Hist Stones Build Monum, 1982(1): 120-144.
- [5] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟和土遗址保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2003.
WANG Xu-dong. The reinforcement of grotto and soil site protection in Chinese Northwest arid environment [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2003.
- [6] 张虎元, 刘平, 王锦芳, 等. 土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1883-1891.
ZHANG Hu-yuan, LIU Ping, WANG Jin-fang, et al. The research of surface crust and reliance mechanism of soil construction site [J]. Rock Soil Mech, 2009, 30(7): 1883-1891.
- [7] 吕殿青, 王文焰, 王全九. 入渗与蒸发条件下土壤水盐运移的研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 61.
LV Dian-qing, WANG Wen-yan, WANG Quan-jiu. Research on salt and water movement under infiltration and evaporation conditions [J]. Soil Water Conserv, 1999, 6(2): 61.
- [8] 罗焕炎, 严嵩芬, 谢驹华, 等. 层状土中毛管水上升的实验研究[J]. 土壤学报, 1995, 9(3): 312-314.
LUO Huan-yan, YAN Ai-fen, XIE Ju-hua, et al. The experimental study of capillary rise of water in layered soil [J]. J soil, 1995, 9(3): 312-314.
- [9] 吕殿青. 土壤水盐运移实验研究与数学模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
LV Dian-qing. Experimental study and mathematical simulation of soil water and salt transport [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000.
- [10] 史文娟, 沈冰, 汪志荣. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 9(9): 23-24.
SHI Wen-juan, SHEN Bing, WANG Zhi-rong. The research on soil water and salt transport in sand layer under evaporation of shallow groundwater table [J]. Agr Eng, 2005, 9(9): 23-24.
- [11] 尤文瑞. 土壤盐渍化预测预报的研究[J]. 土壤学进展, 1988, (1): 1-8.
YOU Wen-rui. The prediction research of soil salinization [J]. Ad Soil Sci, 1988, (1): 1-8.
- [12] 冯宝平. 入渗条件下, 温度对土壤水分运动及参数影响的实验研究[D]. 西安理工大学, 2001: 2, 13-16.
FENG Bao-ping. Study of temperature on the influence of soil

- water movement and parameters under the infiltration conditions [D]. Xi'an Polytechnic University, 2001;2, 13-16.
- [13] 汪增涛,孙西欢,马娟娟,等.蓄水坑灌条件下室内土柱蒸发试验研究[J].灌溉排水学报,2011,30(1):84.
WANG Zeng-tao, SUN Xi-huan, MA Juan-juan, *et al.* Experimental study on soil column evaporated under water storage pit irrigation[J]. Irrigat Drainage, 2011, 30(1):84.
- [14] 高红贝.温度对土壤水分运动及参数的影响研究[D].西北农林科技大学,2011;5,1-2,12.
GAO Hong-bei. Effect of temperature on soil water movement and parameters [D]. NWAUFU, 2011;5, 1-2, 12.
- [15] 陕西省考古研究所,秦始皇兵马俑博物馆.秦始皇帝陵园考古报告,1999[M].北京:科学出版社,2000:166.
Shaanxi provincial institute of archaeology, Terracotta Warriors Museum. The archaeological report of Emperor Qin Shi Huang Mausoleum[M]. Beijing: Science Press, 2000:166.
- [16] Tanto T W, Armstrong A S B, Rycroft D W. Movement of water in restructured saline and sodic clay topsails under a rainfall simulators[J]. Agr Water Manag, 1996, 29(3):255-265.
- [17] 黄四平,赵岗,李玉虎.模拟土遗址中可溶盐运移规律的初步探索[J].土壤学报,2011,3(2):297-298.
HUANG Si-ping, ZHAO Gang, LI Yu-hu. The preliminary exploration of the soluble salt migration rule in simulated soil sites [J]. J Soil, 2011, 3(2):297-298.
- [18] 李宏志,徐连生,李玉华,等.用电导仪测定土壤可溶盐的方法[J].河北水利科技,1996,17(4):33-35.
LI Hong-zhi, XU Lian-sheng, LI Yu-hua, *et al.* The method to test the soil soluble salt using conductivity meter [J]. Hebei Prov Water Conserv Sci Technol, 1996, 17(4):33-35.
- [19] 王永进,于群力,阎敏,等.北方地区寺庙、殿堂壁画可溶盐活动规律的实验室模拟研究[J].文物保护与考古科学,2010,22(3):18.
WANG Yong-jin, YU Qun-li, YAN Min, *et al.* The laboratory simulation research activity patterns of soluble salt about northern temple and the temple mural [J]. Sci Conserv Archaeol, 2010, 22(3):18.
- [20] 李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,2001:167-190.
LI Xue-yuan. Soil chemistry [M]. Beijing: Advanced Education Press, 2001:167-190.
- [21] 李成保,季国亮.恒电荷土壤和可变电荷土壤动电性质的研究[J].土壤学报,2000,37(1):62-68.
LI Chang-bao, JI Guo-liang. The electrokinetic properties of constant charge soils and variable charge soils [J]. J Soil, 2000, 37(1):62-68.

Preliminary research on water and salt migration at the acrobat pit site in Emperor Qinshihuang's Mausoleum using soil columns

ZHANG Dan¹, ZHANG Shang-xin², XIA Yin², ZHANG Jian-guo³, SUN Zhi-chao²,
FU Qian-li², HU Dao-dao¹

(1. Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. Key Scientific Research Base of Ancient Polychrome Pottery Conservation SACH, Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Museum, Lintong 710600, China;

3. Northwest A & F University, Collage of National Resources and Environment, Yangling 712100, China)

Abstract: The damage caused by the salt weathering is one of the biggest problems at soil ruins. Understanding the rules of soluble salt content and concentration in soils can provide theoretical and technical support for soil site conservation. Soil columns were prepared in plexiglass containers having EM50 detectors to study the moisture content and conductivity of the soil column longitudinally at different depths. The results were used to understand the type and migration of various salts in the soil column. It was found that the lower the moisture content, the greater the conductivity. Ion chromatography showed that Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} contents all change together with salinity at various depths. This study provides a theoretical reference for the soil ruins management.

Key words: Soil column; Soluble salt movement; Salt content

(责任编辑 谢燕)