

电导率在土遗址易溶盐快速测定中的研究与应用^{*}

郭青林^{1,2,3,4}, 周杰², 裴强强^{1,2,3,4}, 尚东娟^{3,4}, 李志强^{3,4}

(1. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200; 2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州, 730000; 3. 甘肃省古代壁画与土遗址保护研究重点实验室, 甘肃 敦煌 736200; 4. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘要: 盐害严重影响着土遗址的保存, 并诱发一系列的病害, 为快速、准确地测定遗址土体中易溶盐的总含量, 本研究基于盐溶液导电原理, 测试遗址土体中常见的易溶盐及其混合盐电导率与含盐量的关系, 采用固定容器和适宜的操作方法, 建立电导率与含盐量的关系, 将电导率与含盐量关系曲线分为线性区、指数区和参考区, 并给出相应区域含盐量的回归方程和测定误差, 通过现场试验验证电导率测试法在遗址保护加固工程中水源检测、工程用土选址和遗址盐分测定中的可靠性。研究表明: 已知盐分类型和混合比例的情况下, 电导率在 0~8 ms/cm 时, 电导率与含盐量具有很好的线性关系, 线性相关系数超过 0.98; 电导率在 8~12 ms/cm 时, 电导率与含盐量表现为指数关系, 相关系数超过 0.99, 电导率大于 12 ms/cm 时, 含盐量变化迅速, 可据此得到遗址体含盐量的下限。未知类型的盐渍土, 线性区的测试误差低于 0.2% 的土体含盐量, 指数区的测试误差低于 0.5%, 并在水源、工程用土土源和夯筑墙体易溶盐检测中, 取得了很好的效果。该方法具有操作简便、快速测试、微损检测的优点, 所测的土体易溶盐含量具有较高的精度, 满足实际工程中快速测试评价的要求。

关键词: 土遗址; 溶液电导率; 含盐量; 测试方法

中图分类号: O319.56

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)03-0891-11

Study and Application of Electrical Conductivity to Rapid Determination of Salt Content in Earthen Sites

Guo Qinglin^{1,2,3,4}, Zhou Jie², Pei Qiangqiang^{1,2,3,4}, Shang Dongjuan^{3,4}, Li Zhiqiang^{3,4}

(1. National Technological Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Heritage Sites, Dunhuang, Gansu 736200, P.R. China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P.R. China; 3. Key Laboratory of Conservation and Research for Ancient Murals and Earthen Heritage Sites of Gansu Province, Dunhuang, Gansu 736200, P.R. China; 4. Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, P.R. China)

Abstract: Salt damage seriously affects the preservation of earthen sites and induces a series of diseases. To measure the total quantity of soluble salts in site soil quickly and accurately, this study tested the relationship of conductivity and salt content of common soluble salt and their mixed salt in site soil based on the conductive principle of soluble salt solution. It adopted fixed containers and appropriate operational methods to establish the relationship between conductivity and salt content, dividing relation curve of conductivity and the salt content into the linear area, exponential area and reference area. And it provided regression equation of salt content in the corresponding area and

^{*} 收稿日期: 2018-11-14(修改稿)

作者简介: 郭青林(1976—), 男, 甘肃榆中人, 博士, 研究员, 主要从事岩土文物的保护研究与实践。

E-mail: 3037582@qq.com

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAK16B02); 甘肃省基础研究创新群体项目(145RJF336)

error of measurement. In addition, it conducted field tests to verify the reliability of conductivity test method used in water source detection, engineering site selection and site salt determination in the site protection and reinforcement projects. The research results show that the conductivity and salt content keep a good linear relationship with a correlation coefficient of over 0.98 when the conductivity is in 0~8 ms/cm in the conditions of known salt type and mixing ratio, and the conductivity and salt content keep an exponential relationship with a correlation coefficient of more than 0.99 when the conductivity is in 8~12 ms/cm. When the conductivity is over 12 ms/cm the salt content changes rapidly, then from which the lowest limit of salt content can be obtained. Under the conditions of unknown types of salty soil, the measuring error of soil salt content in linear area is lower than 0.2% of the total salt content, and the measuring error in exponential area is lower than 0.5%. And it achieves a good result in the detection of soluble salts in water and engineering soil and rammed earthen walls. This method has the advantage of simple operation, rapid testing and micro-damage detection and reaches a high accuracy of soluble salt content in the measured soil, which meets the requirement of rapid testing in practical engineering.

Keywords: earthen site; solution conductivity; salt content; test method

0 引言

易溶盐是我国西北地区土遗址破坏的主要诱因之一,酥碱、片状剥离、表面泛白和酥碱掏蚀等是土遗址常见的盐害表现形式^[1]。陈雨^[2]和蔺青涛等^[3]对我国西北地区典型土遗址——锁阳城遗址、嘉峪关长城遗址、交河故城遗址、北庭遗址、西夏陵遗址和水洞沟遗址的盐分进行了统计分析,结果表明,这些遗址中主要的易溶盐为 NaCl 和 Na_2SO_4 ,且大多数遗址中 Na_2SO_4 含量等于或高于 NaCl。这两种常见易溶盐中, Na_2SO_4 在潮湿环境下易潮解生成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,显微观察表明 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 结晶后体积会增大为原来的 3 倍^[4],使遗址土体微观结构产生张裂破坏,降低遗址土体的力学性能^[5]; NaCl 结晶后体积不会明显的增大,但 NaCl 存在会降低 Na_2SO_4 的溶解度,从而加剧遗址土体的破坏程度^[6],加速土体劣化。

一定范围内,遗址土体内易溶盐的含量严重影响着土遗址的保存和有效保护,常见测试遗址土体含盐量的方法有溶液滴定法^[7]、烘干质量法^[8-9]、离子色谱仪法^[10-11]和溶液电导率法^[12]。现行常用的溶液滴定法、质量烘干称重法和离子色谱仪法具有测试准确、可靠性高的优势,然而这些方法均需要使用去离子水制作土体的浸出液,操作过程复杂,测试周期长,测试地点一般局限于室内,无法满足现场快速测试的目的,并且运输过程中由于水分散失会引起土体盐分的不均匀变化,进而导致室内含盐量测试结果的偏差。

依据西北地区典型土遗址盐分调查,本试验以 NaCl 和 Na_2SO_4 为研究对象,基于盐渍土体溶液导电原理^[13],使用哈纳 HI98331 微电脑笔式土壤电导率测定仪标定土体溶液电导率与含盐量的关系。

土遗址含盐量测试中,该方法对区域已知类型盐渍土具有较高的测试精度,在未知类型盐渍土中也有可靠的精度,测试中只需取 50 g 少量样品,对遗址本体破坏较小,具有微损测试的优点;本实验采用土水混合溶液测试,无需制作土壤浸出液,经过标定后亦无需使用去离子水,操作方法简便快捷,节省时间,满足现场快速检验土体含盐量的要求。

1 测试方法

1.1 试验原理

实验使用哈纳 HI98331 微电脑笔式土壤电导率测定仪,通过测试土水混合溶液电导率标定遗址土体中的含盐量。测试时 A 端、B 端和外界溶液共同构成闭合回路,电压一定条件下,当外界导电介质本身变化不大时,介质的电导率稳定,通过电流大小确定土水溶液的电导率,进而标定土水溶液中离子的含量(图 1)。

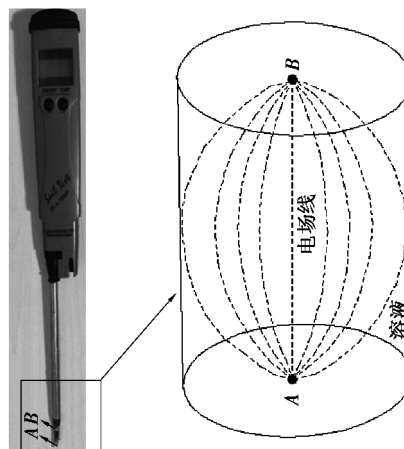


图 1 电导率测试原理

Fig. 1 The principle of a conductivity test

一定条件下,土水溶液中自由移动的离子浓度越大、离子所带电荷数越多,溶液的导电能力越强,

干燥的盐分晶体和纯净的蒸馏水均不导电^[14]。

1.2 常见遗址区盐分调查

本文对锁阳城、北石窟、交河故城、西夏王陵等13处西北地区常见遗址的易溶盐含量进行统计,共选取152个测试点。统计各遗址区土体的总含盐量(图2)和每个测试点土体的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Na^+ 和 K^+ 的平均含量,并计算各离子占各测点总含盐量的比例(图3)。

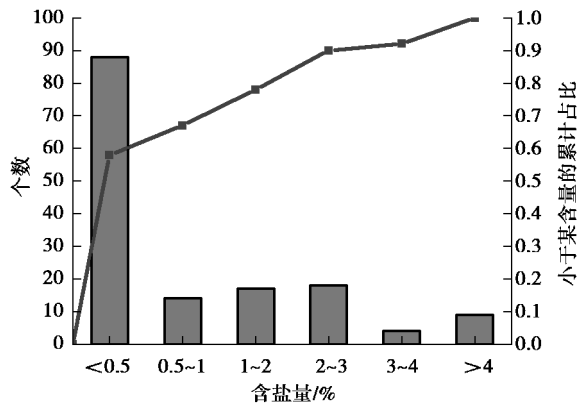


图2 西北地区典型遗址总盐分含量

Fig. 2 Total salt content in sites in the northwest

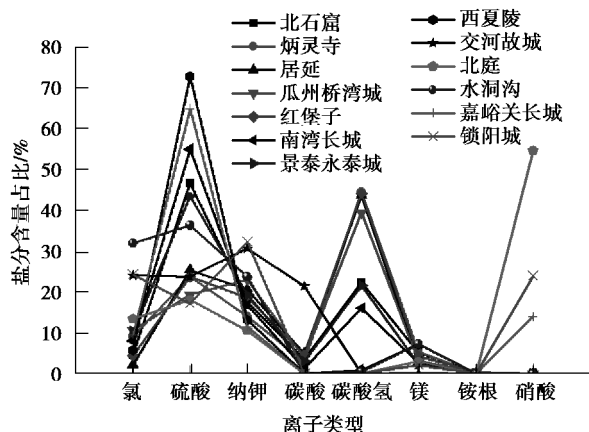


图3 西北地区典型遗址盐分类型分布

Fig. 3 Types of salt in typical sites in the northwest

由图2可知,在152个测试点中,易溶盐含量在0%~0.5%的测试点最多,占统计数据的58%,即超过一半的测点土体含盐量小于0.5%。含盐量小于1%的测点有105个,占统计数据的69.1%;含盐量小于2%的测试点有124个,占统计数据的81.6%;含盐量小于3%的测试点有143个,占统计数据的91.6%,只有极少数土体测试点的总含盐量大于4%。

由图3可知,在13个常见遗址区中, SO_4^{2-} 总含盐量的占比最高且覆盖所有测试遗址区,其含量占总含盐质量的15%~75%;其次 HCO_3^- 的总含盐量占比次之,但其所覆盖的遗址区有限且相对较高

的遗址区占比不到测试区的50%; NO_3^- 在局部遗址区总含盐量的占比较高,其他遗址区含量几乎为0。 Na^+ 和 K^+ 在各遗址测试区总含盐量的占比差距不大,并且其含量相对较高,占总含盐量的10%~25%之间; Cl^- 总含盐量的占比在2.5%~25%之间且覆盖所有遗址测试区。 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ 含量较少,对遗址的影响有限。

统计可知, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 K^+ 的含量占所测试区易溶盐含量的比例均超过40%,其中银川地区的西夏王陵遗址和水洞沟遗址4种离子含量占比超过90%;其他遗址区这4种离子的含量大多在60%~90%之间;交河故城 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量基本相同,接近1:1,其他遗址区 SO_4^{2-} 普遍多于 Cl^- 含量,最高可超过 Cl^- 的10倍。

1.3 土水比对溶液电导率的影响

大量的研究表明,土水质量比和溶解程度显著影响溶液的电导率^[15-16],考虑到不同浓度溶液对电导率的影响,结合现场测试方便、快捷的操作要求,采用250 ml的烧杯作为溶液电导率测试的容器,量取200 ml的去离子水,分别向去离子水中加入10 g、20 g、30 g、40 g、50 g、60 g、70 g、80 g、90 g、100 g烘干含盐土,搅拌至无悬浮颗粒物(大约5 min),土体中易溶盐含盐量为0.1%,使用电导率测试不同土水比溶液的电导率,测试时溶液温度为20℃,测试结果如图4。

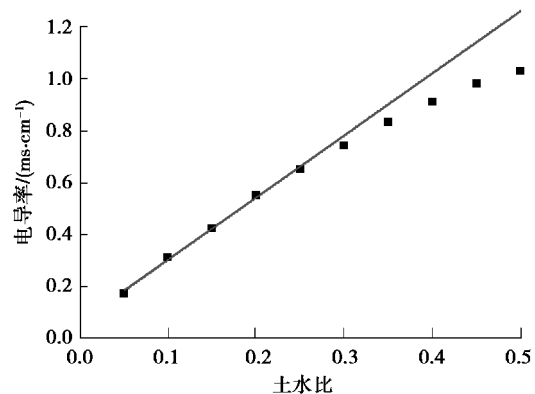


图4 不同土水比对溶液电导率的影响

Fig. 4 Influence of different soil water ratio on conductivity

由图4可知,当土水质量比小于0.25时,土水溶液电导率随土水比增大呈线性增加^[15-16],当土水比大于0.25时,对应比例的水分已不能完全溶解土体中的盐分,溶液中较大土颗粒快速沉淀,形成上下2个不同材质的导电介质,盐离子活性明显降低,随土水比增大溶液电导率增速逐渐变缓,从而影响电导率的测试结果。因此,为确保土水溶液电导率测试结果的稳定性和可重复性,选取土水质

量比 0.25 作为溶液测试的标准土水比,且搅拌时间不少于 5 min,测试时溶液不能出现明显的土水分层现象。

1.4 测试方法

根据西北地区典型土遗址盐分的调查情况^[2-3],选取 NaCl 和 Na₂SO₄ 作为土体添加的易容盐,使用脱盐烘干土配制不同盐分 and 不同混合比例的盐渍土,模拟不同类型的盐渍土,按照盐渍土中 NaCl、Na₂SO₄ 和 NaCl、Na₂SO₄ 混合质量比为 1:1、1:2 和 1:3 共 5 种不同比例易溶盐,以及质量比 1%、2%、3%、4%、5% 和 6% 分别测试其电导率。

采用 250 ml 量程的烧杯量取 200 ml 去离子水,称取烘干的盐渍土 50 g,将 50 g 烘干土体溶于 200 ml 去离子水中,充分搅拌 5 min,待溶液转动基本稳定时进行电导率测试。为保证数据的可靠性,测试时电导率测试笔置于溶液的中间位置,禁止将测试笔探头与烧杯底部和侧壁接触(图 5),同一溶液测量不小于 3 次,3 次所得电导率差值不超过 0.1 ms/cm。



图 5 易溶盐含量测试图

Fig. 5 Soluble salt content test

2 试验标定

2.1 已知类型盐渍土溶液电导率与含盐量标定

由已知类型盐渍土溶液电导率与土体含盐量关系曲线(图 6)可知,相同质量的 NaCl 盐溶液电导率明显高于 Na₂SO₄ 溶液的电导率,随着 NaCl 含量的增加,混合盐的电导率介于两者之间,并且混合盐中随着 NaCl 含量的增加,溶液电导率增加。当溶液中含盐量继续增大时,溶液电导率趋于稳定。

溶液中导电性的强弱与溶液中电荷的浓度有关,一定条件下电荷浓度越高,溶液的导电性越强。1gNa₂SO₄ 完全溶解可得到 0.007 mol 的 SO₄²⁻,即有 0.014 mol 负电荷,相同质量 NaCl 完全溶解可得到 0.017 mol 的 Cl⁻,即有 0.017 mol 负电荷,因而一定

条件下,相同质量的 NaCl 完全溶解,其电导率高于相同质量分数的 Na₂SO₄ 溶液。

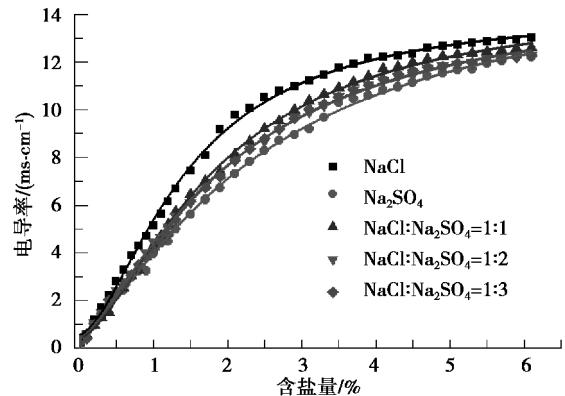


图 6 已知盐溶液含盐量与电导率关系

Fig. 6 The relationship of known salt content and conductivity

根据已知类型盐渍土溶液电导率与含盐量的曲线(图 7),对含盐量与电导率关系进行分区,溶液电导率在 0~8 ms/cm 时,各盐渍土溶液含盐量与电导率具有较好的线性关系,随着含盐量的增加,土体电导率线性增加,0~8 ms/cm 电导率区间的含盐量测试区段称为“线性区”;溶液电导率在 8~12 ms/cm 时,土体电导率与含盐量具有较好的指数关系,称之为“指数区”。当电导率大于 12 ms/cm 时,含盐量的增减对电导率的影响较小,即便大幅度增加易溶盐的含量,该设备测试溶液电导率的变化范围依然有限,电导率只能获得土体含盐量对应的电导率下限,对土中含盐量超过某一指标具有指导意义,将其称之为“参考区”。

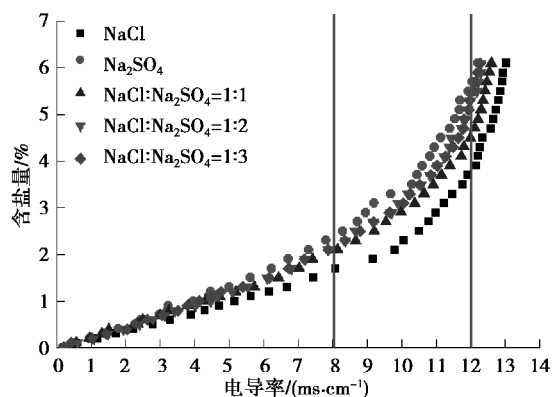


图 7 含盐量测试分区图

Fig. 7 Test partition of salt content

根据不同区曲线的形式进行相应区段的回归分析,得到不同种类型盐渍土溶液电导率与土体含盐量的回归方程和各区段曲线的相关系数,获得不同类型盐渍土含盐量的测试误差(表 1),且根据回归曲线,推导出表 2 盐分类型溶液电导率与土体含盐量的快速对照表,方便工程土源、水源易溶盐含

量的快捷筛选。由表 1 和表 2 可知,线性区和指数测试误差在 0.05%~0.15%的土体含盐量,具有较高的测试准确度。

表 1 不同种类的盐溶液电导率与含盐量分区回归表

Table 1 Regressions table for different types of salt solution conductivity and salinity

盐分类型	分区	回归公式	相关系数	误差
NaCl	线性区	$y = 0.210\ 3x - 0.069\ 8$	0.996	0.05%
	指数区	$y = 0.065\ 5\exp(x/3.093\ 3) + 0.593\ 5$	0.996	0.05%
NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 1	线性区	$y = 0.263\ 8x - 0.082\ 8$	0.990	0.12%
	指数区	$y = 0.048\exp(x/2.875\ 5) + 1.329\ 4$	0.996	0.1%
NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 2	线性区	$y = 0.283x - 0.159\ 7$	0.988	0.1%
	指数区	$y = 0.005\ 7\exp(x/1.887\ 7) + 1.974\ 7$	0.995	0.1%
NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 3	线性区	$y = 0.288\ 5x - 0.149\ 4$	0.990	0.12%
	指数区	$y = 0.005\ 3\exp(x/1.884\ 1) + 2.035\ 5$	0.993	0.1%
Na ₂ SO ₄	线性区	$y = 0.308\ 7x - 0.152\ 1$	0.991	0.15%
	指数区	$y = 0.014\exp(x/2.158) + 1.991\ 1$	0.993	0.15%

表 2 盐分类型溶液电导率与含盐量快速对照表

Table 2 Comparison of conductivity and salt content of known types of salt solution

电导率/ (ms · cm ⁻¹)	盐分类型				
	NaCl	NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 1	NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 2	NaCl : Na ₂ SO ₄ = 1 : 3	Na ₂ SO ₄
0	0	0	0	0	0
0.5	0.071	0.091	0.062	0.067	0.079
1	0.141	0.181	0.123	0.139	0.157
1.5	0.246	0.313	0.265	0.283	0.311
2	0.351	0.445	0.406	0.428	0.465
2.5	0.456	0.577	0.548	0.572	0.620
3	0.561	0.709	0.689	0.716	0.774
3.5	0.666	0.841	0.831	0.860	0.928
4	0.771	0.972	0.972	1.005	1.083
4.5	0.877	1.104	1.114	1.149	1.237
5	0.982	1.236	1.255	1.293	1.391
5.5	1.087	1.368	1.397	1.437	1.546
6	1.192	1.500	1.538	1.582	1.700
6.5	1.297	1.632	1.680	1.726	1.854
7	1.402	1.764	1.821	1.870	2.009
7.5	1.507	1.896	1.963	2.014	2.163
8	1.613	2.028	2.104	2.159	2.318
8.5	1.718	2.212	2.368	2.411	2.591
9	1.823	2.366	2.516	2.556	2.762
9.5	2.006	2.652	2.849	2.856	3.134
10	2.254	2.903	3.114	3.105	3.432
10.5	2.545	3.202	3.459	3.431	3.808
11	2.888	3.558	3.909	3.854	4.281
11.5	3.290	3.981	4.496	4.407	4.878
12	3.763	4.485	5.261	5.128	5.631

注:电导率单位为 ms/cm,土体含盐量为%,中间值可采用内插法求解。

2.2 未知盐渍土类型溶液电导率与含盐量标定

将不同类型和不同混合比例的盐溶液测试数据汇总,未知类型盐渍土溶液电导率与含盐量的关系,与遗址类型盐渍土溶液电导率有较好的相似度(图 8)。

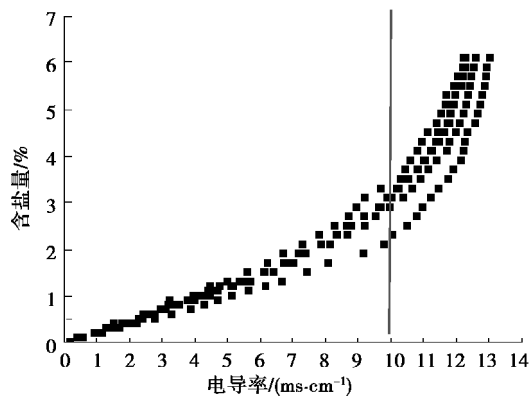


图 8 未知盐溶液电导率与含盐量的关系
Fig. 8 Relationship between conductivity and salt con tent of unknown salt solution

对未知的混合盐溶液电导率进行回归分析,根据未知盐溶液电导率与含盐量的关系,对曲线进行分区。当电导率在 0~6 ms/cm 时,含盐量与电导率呈线性关系,且该区段溶液电导率与含盐量相关性较好,所有土体易溶盐含量的实际值与拟合公式的计算值最大差值均小于 0.2% 的土体含盐量,表明该测区使用拟合公式可获得较高精度的土体含盐量测试结果。当电导率在 6~10 ms/cm 时,含盐量与电导率呈指数关系,该区段所有土体易溶盐含量的实际值与拟合公式计算值的差值均小于 0.5% 的土体含盐量,该区段测试精度低于线性区段测试精度,对易溶盐含量的测试具有一定的指导意义。当电导率超过 10 ms/cm 时,溶液含盐量与电导率的相关性较差,此时依然可粗略得到该测区盐渍土含盐量下限。根据图 8 获得未知混合盐溶液电导率与含盐量的分段经验公式(表 3),依据图 8 分区图和表 3 绘制未知盐渍土类型溶液电导率与含盐量的快速对照表(表 4)。

表 3 未知类型盐溶液电导率经验公式

Table 3 The empirical formula for the conductivity of unknown type salt solution				
盐分类型	分区	拟合公式	相关系数	误差/%
未知比例 混合盐	线性区	$y=0.240\ 4x-0.042\ 7$	0.962	0.2
	指数区	$y=1.940\ 2\exp(x/10.600\ 7)-1.988\ 3$	0.845	0.5

表 4 未知比例盐溶液电导率与含盐量快速对照表

Table 4 Comparison of conductivity and salt content of unknown ratio salt solution					
电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%
0	0	4.5	1.039	9	2.547
0.5	0.078	5	1.159	9.5	2.766
1	0.198	5.5	1.275	10	2.995
1.5	0.318	6	1.429	10.5	3.236
2	0.438	6.5	1.594	11	3.488
2.5	0.558	7	1.767	11.5	3.753
3	0.679	7.5	1.948	12	4.030
3.5	0.799	8	2.138		
4	0.919	8.5	2.338		

注:中间值可采用内插法求解。

3 工程验证

为验证本试验测试方法和结论的可靠性,依托

额济纳旗大同城遗址保护工程对工程水源、土源,通过对比同一样品采用电导率测试法与离子色谱仪测试法结果,分析该方法测试结果的可靠性,进

一步验证电导率法在低含水率夯筑土体中易溶盐含量测试的可靠性。

3.1 水源含盐质量评价

大同城保护工程采用额济纳旗地区地下承压水作为工程加固水源。根据工程施工要求,施工用土含盐量不能超过0.5%的准则,水源含盐量不能超过该值。施工项目部委托兰州煤矿设计研究院对水源易溶盐含量进行检测,测试结果显示易溶盐含量为0.140%。

采用电导率测试水源易溶盐含量,量取200 ml工程用水,按要求测试电导率为0.74 ms/cm。查找表3可知,电导率为0.74 ms/cm时处于线性区,查找未知比例盐溶液电导率与含盐量快速对照表(表4)得知水源易溶盐含量为0.135%,测试误差小于0.01%,满足实际工程中水源含盐质量的评价,并且具有很高的测试精度。试验表明,电导率法在土遗址保护工程中水源检测评价效果中是极可靠的,该方法可用于工程水源含盐质量评价。

3.2 夯筑墙体盐分测试

1、2、3号样品为墙体阳面不同高度的面层土体,4、5、6号样品为墙体阴面不同高度的面层土体,由于土遗址所处环境一般较为干燥,且样品为面层土体,含水率普遍较低。按电导率分区方法,1、2号测点位于线性区,由测试结果可知,1、2号测点两种测试方法误差为0.09%和0%的土体含盐量,测试误差低于0.1%的土体含盐量,满足测试要求;3~6号测点位于指数区,测试误差在0%~0.49%的土体含盐量,测试误差仍小于0.5%,对工程施工具有一定指导意义。

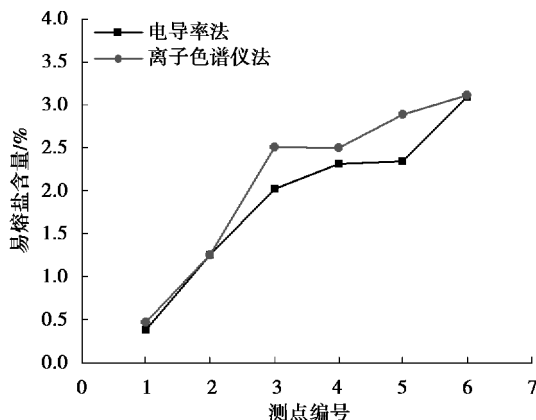


图9 夯墙土体含盐量测试方法对比图

Fig. 9 Comparison of test methods of salt content in the wall

由图9可知,离子色谱仪的测试结果略高于电导率法测试结果。根据上述分析可知,电导率测试

与离子色谱仪测试结果相差不大,电导率法在低含水率夯筑墙体易溶盐含量测试中,当易溶盐含量低于1.5%时(线性区),具有很好的测试效果;当易溶盐含量在1.5%~3.5%(指数区)时,电导率测试法的测试结果对指导工程施工仍具有一定现实意义。因而,电导率法在低含水率墙体的含盐量测试中具有较好的测试效果。

3.3 工程用土筛选

按照施工用土含盐量不得超过0.5%的要求,需对工程用土的含盐量进行评价。结合实际工程地质条件,选择5个备用土源进行含盐量测试,使用电导率法测试每个土源地土体易溶盐含量随深度的变化,测试结果如图10。

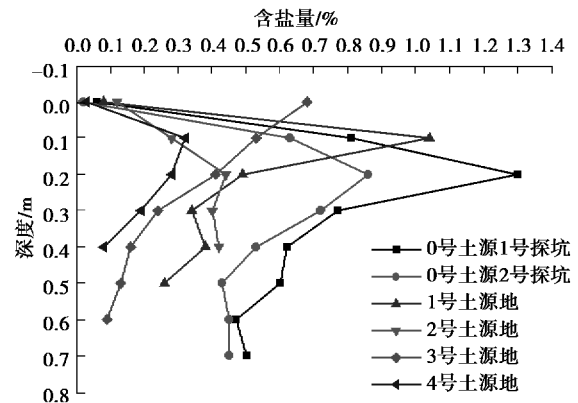


图10 土源地含盐量随深度的变化曲线

Fig. 10 Variation of salt content with depth in soil source

实际施工过程中,工程用土自开采到工程使用经过多遍翻土搅拌,因而评价土源地土体易溶盐含量应选择该土源地不同深度土体易溶盐含量的平均值。在5处土源地,0号土源地平均易溶盐含量为0.58%,不符合工程要求。1号和3号土源地平均易溶盐含量均高于0.4%,考虑电导率法测试存在一定误差和文物保护的安全性,1号和3号土源地应慎用。2号和4号土源地易溶盐含量分别为0.33%和0.18%,对比分析知4号土源地平均易溶盐含量最低且最符合土遗址工程加固用土的标准,可作为工程用土土源地,2号土源地可作为备用土源。选取4号土源地进行室内试验验证,室内采用离子色谱仪法测试土体易溶盐的含量。

对比电导率测试法与离子色谱仪测试法的结果(图11),离子色谱仪的测试得4号土源地平均易溶盐含量为0.26%,与电导率法测试结果差0.08%的土体含盐量,该精度可满足工程选土要求。分析可知,离子色谱仪测试采用烘干土体,电

导率法为快速测试忽略土体含水率对测试结果的影响;并且离子色谱仪法使用浸出液进行易溶盐测试,排除土体中微小带电粒子和其他土颗粒对实验结果的影响,这些都是可能影响电导率测试法精度的因素。

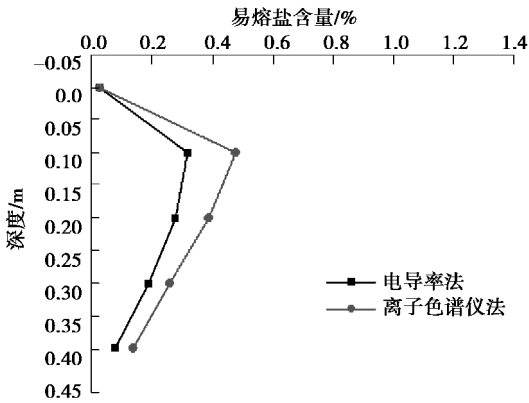


图 11 土源地含盐量测试方法对比图
Fig. 11 Test method comparison of salt content in earth sources

电导率法与离子色谱仪测试曲线变化趋势基本一致,由离子色谱仪法测试曲线可知,4 号土源地土体的易溶盐含量均小于 0.5%,平均易溶盐含量为 0.26%,满足遗址加固用土的含盐量标准,与电导率测试法所得 0.18%的平均易溶盐含量相差不大,表明电导率测试法在遗址加固工程选土中的应用是可行的。

3.4 误差分析

离子色谱仪法、离子滴定法均使用烘干土体和过滤后的溶液作为易溶盐测试对象,本文电导率法为达到快速检测的目的,选择未烘干土体和未过滤溶液作为研究对象。为研究含水率和溶液中土颗粒对电导率测试法的影响,选择肃南县草沟井地区备用土源地土体(9 组)为实验对象,编号 1~9,每组取 9 个平行式样,共 81 个土样,评价含水率和溶液中土颗粒对其测试效果的影响。

3.4.1 含水率对电导率测试结果的影响

9 组土体的平均含水率如表 5,每组 9 个平行土样中取 3 个进行烘干处理,3 个未做烘干处理、使用电导率法测试溶液电导率,进一步获得土体易溶盐含量。

结合表 5 和图 12 分析可知,所测得烘干土体的易溶盐含量略高于未烘干土体的易溶盐含量,土体含水率引起的电导率测试误差在 0.01%~0.055%之间,且大部分低于 0.04%,含水率较高的土体测试误差普遍相对较大。由于土体未做烘干处理,所称取的 50 g 土体低于实际质量,土体中水分被带到溶液中增加溶剂质量,由于该区域内土体含水率普遍较低(低于 4%),因而未烘干土体易溶盐含量测试结果略低于烘干土体所测试的结果,对于含水率较高的区域,建议对土体进行晾晒或烘干后在进行易溶盐测试。

表 5 烘干和未烘干土体电导率法测试结果

Table 5 Solution conductivity test results of dry and unbaked soil

编号	含水率/ %	未烘干+未过滤		烘干+未过滤		电导率 差值/%
		电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	
1	1.27	0.59	0.09	0.68	0.121	0.031
2	3.71	2.07	0.44	2.2	0.486	0.046
3	2.68	1.83	0.397	1.87	0.407	0.01
4	2.46	1.27	0.263	1.36	0.284	0.021
5	3.41	1.06	0.212	1.16	0.236	0.024
6	3.29	0.77	0.143	0.99	0.198	0.055
7	3.65	2.65	0.594	2.7	0.606	0.012
8	3.25	2.71	0.609	2.77	0.623	0.014
9	2.69	2.19	0.484	2.34	0.52	0.036

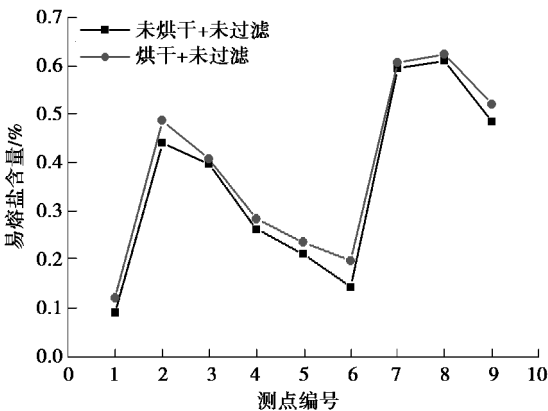


图 12 含水率对电导率测试法的影响

Fig. 12 Influence of water content on conductivity test method

3.4.2 溶液中土颗粒对电导率测试结果的影响

一定条件下,溶液中盐离子和其他微小带电粒子的多少影响着土水溶液的导电性能。为明确其他带电粒子和土体颗粒对土水溶液电导率测试

结果的影响,9 组试样中每组选取 3 个平行试样按土水比 0.25 制成土水溶液,使用滤纸过滤土颗粒,量取过滤后溶液 200 ml,使用电导率法测试土体易溶盐含量,对比未过滤测试结果如表 6。

结合表 6 和图 13 分析可知,过滤溶液电导率测试结果略高于未过滤土水溶液,两者所获得的土体易溶盐含量差在 0.002%~0.039%之间,相较于线性区段 0.2%的测试误差该差值相对较小。过滤掉土水溶液中土颗粒,即过滤掉土体中的微小带电粒子,过滤后溶液电导率完全由溶液中离子含量决定,此时过滤溶液电导率应小于未过滤溶液的电导率。然而实验表明,过滤后溶液电导率要略高于未过滤溶液电导率,表明溶液微小带电粒子对土水溶液导电性影响不大,溶液中悬浮的土颗粒降低了溶液的导电性,从而影响溶液易溶盐含量的测试。

表 6 过滤和未过滤土体溶液电导率法测试结果

Table 6 Conductivity test results of filtered and unfiltered soil solution

编号	含水率 %	未烘干+未过滤		未烘干+过滤		电导率差值/%
		电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	电导率/(ms·cm ⁻¹)	含盐量/%	
1	1.27	0.59	0.09	0.6	0.102	0.012
2	3.71	2.07	0.44	2.17	0.479	0.039
3	2.68	1.83	0.397	1.9	0.414	0.017
4	2.46	1.27	0.263	1.37	0.278	0.015
5	3.41	1.06	0.212	1.17	0.23	0.018
6	3.29	0.77	0.143	0.78	0.145	0.002
7	3.65	2.65	0.594	2.78	0.626	0.032
8	3.25	2.71	0.609	2.81	0.633	0.024
9	2.69	2.19	0.484	2.35	0.522	0.038

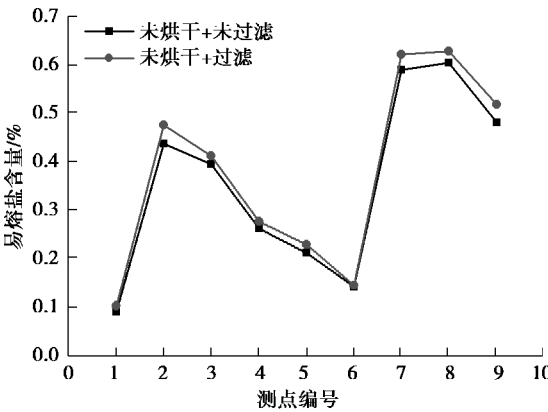


图 13 溶液中土颗粒对电导率测试法的影响

Fig. 13 Influence of soil particles in solution on conductivity test

4 结论

通过固定类型的烧杯和土水比建立稳定的溶液导电介质,使用笔式电导率测定仪测试混合液的电导率,进而标定出土体和水中的易溶盐含量。实验表明:

(1)相同质量 Na₂SO₄盐溶液的电导率小于相同质量 NaCl 盐溶液的电导率,一定浓度范围内,溶液电导率的大小取决于溶液中电荷的浓度。

(2)对同类盐渍土,一定范围内溶液电导率随含盐量线性增加;当含盐量超过一定范围时,电导率与含盐量呈指数关系;当盐浓度增大到一定程度时,电导率变化规律不明显。根据电导率与含盐量

的变化关系,将电导率含盐量曲线分为线性区段、指数区段和参考区段。

(3)本文操作方法条件下,获得电导率与含盐量的经验公式,并且该经验公式在指导工程实际施工中获得很好的效果。在土源选址中具有很好的测试精度;在低含水率夯筑墙体易溶盐含量的测试中线性区段获得很高的测试精度,指数区获得较好的测试精度;在指导工程加固水源选择的应用中,具有很高的精度。

(4)土体含水率和溶液中土体颗粒是导致离子色谱仪测试结果高于电导率测试法的主要原因,且整体上含水率对测试结果的影响高于土颗粒对溶液电导率的影响。当土体含水率较高时,可通过晾晒或烘干土体减小电导率法在土体易溶盐含量测试中的误差。

参考文献(References)

- [1] 李最雄,王旭东,孙满利. 交河故城保护加固技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (Li Zuixiong, Wang Xvdong, Sun Manli. Study on the technology of protection and reinforcement in Jiaohe Gucheng[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 陈雨. 西北干旱区土遗址盐害室内试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (Chen Yu. Study on salt damage of soil sites in northwest arid area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))
- [3] 蔺青涛,王旭东,郭青林,等. 银川西夏陵3号陵、6号陵盐害现状初步分析[J]. 敦煌研究, 2009(6): 75-80. (Lin Qintao, Wang Xudong, Guo Qinling, et al. Preliminary analysis of salt damage in No. 3 and No. 6 mausoleums in Yinchuan[J]. Dunhuang Studies, 2009(6): 75-80. (in Chinese))
- [4] Price C A. Predicting environmental conditions to minimise salt damage at the Tower of London: a comparison of two approaches [J]. Environmental Geology, 2007, 52(2): 369-374.
- [5] Steiger M. Crystal growth in porous materials—II: Influence of crystal size on the crystallization pressure [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 282(3-4): 470-481.
- [6] 张虎元,闫玲,王锦芳. 土质文物盐害的毛细水输盐机制研究[A]//2008 古遗址保护国际学术讨论会暨国际岩石力学学会区域研讨会[C]. 2008: 118-124. (Zhang Huyuan, Yan Lin, Wang Jinfang. Study on the mechanism of salt water transport by salt water in soil with cultural relics[A]//2008 International Symposium on the Protection of Ancient Ruins and the International Workshop on Rock Mechanics[C]. 2008: 118-124. (in Chinese))
- [7] 古丽扎提. 滴定分析法在土的易溶盐测定中的应用[J]. 山西建筑, 2011, 37(15): 82-83. (Guli Zhati. Application of titrimetric analysis in the determination of soil evaporated salts [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(15): 82-83. (in Chinese))
- [8] 朱晓涛,米晓辉,王玉萍. 两种测定土壤全盐量方法的比较[J]. 甘肃农业科技, 2010(4): 14-16. (Zhu Xiaotao, Mi Xiaohui, Wang Yuping. Comparison of two methods for testing total salt content in soil [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2010(4): 14-16. (in Chinese))
- [9] 李燕飞,苏伯民,范宇权. 离子色谱法在文物发掘现场及保护中的应用[J]. 敦煌研究, 2008(6): 97-101. (Li Feiyan, Su Bomng, Fan Yvquan. Application of ion chromatography in site and protection of cultural relics excavation [J]. Dunhuang Studies, 2008(6): 97-101. (in Chinese))
- [10] 何文寿,刘阳春,何进宇. 宁夏不同类型盐渍化土壤水溶盐含量与其电导率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 111-116. (He Wenshou, Liu Yangchun, He Jinyv. Relationship between content of soluble salts and electric conductivity of different types of saline soils in Ningxia [J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 111-116. (in Chinese))
- [11] 陈港泉,于宗仁. 莫高窟第351窟壁画疱疹和壁画地仗可溶盐分析[J]. 敦煌研究, 2008(6): 39-45. (Chen Gangquan, Yu Zongren. Mural grottoes and mural soluble salt analysis at cave 351 on Mogao Grottoes [J]. Dunhuang Studies, 2008(6): 39-45. (in Chinese))
- [12] 何雨江,时磊. 土壤溶液浓度的野外测定方法研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 213-215. (He Yvjiang, Shi Lei. Study on the field determination method of soil solution concentration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 213-215. (in Chinese))
- [13] 程姝菲,黄宏伟. 盾构隧道长期渗漏水检测新方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 733-738. (Chen Shufei, Huang Hongwei. Monitoring methods of long-term water seepage in shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 733-738. (in Chinese))
- [14] 陈丽梅,程敏熙,肖晓芳,等. 盐溶液电导率与浓度和温度的关系测量[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 39-42. (Chen Meili, Chen Minxi, Xiao

- Xiaofang, et al. Relationship between the concentration of the salt solution conductivity and temperature [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(5): 39-42. (in Chinese))
- [15] 郭新送, 宋付朋, 鞠正山. 不同土水比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 812-818. (Guo Xinsong, Song Fupeng, Ju Zhengshan. Comparative study on electrical conductivity between saturated soil paste and saturated soil solutions under different soil/water ratios [J]. Soils, 2015, 47(4): 812-818. (in Chinese))
- [16] 吴月茹, 王维真, 王海兵, 等. 采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 869-873. (Wu Yueru, Wang Weizhen, Wang Haibing, et al. Analysis of variation of soil salt with new electric conductivity index [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 869-873. (in Chinese))
-
- (上接第 785 页)
- [6] 乔继彤, 张若京. 横观各向同性体中的埋藏裂纹[J]. 力学季刊, 2000, 21(4): 487-491. (Qiao Jitong, Zhang Ruojing. Embedded crack in transversely isotropic body[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2000, 21(4): 487-491. (in Chinese))
- [7] 孙可明, 张树翠, 李天舒. 横观各向同性油气藏水力压裂裂纹扩展规律研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33(5): 767-772. (Sun Keming, Zhang Shucui, Li Tianshu. Study on the law of transversely reservoir crack extension during hydraulic fracture[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(5): 767-772. (in Chinese))
- [8] 梁正召, 唐春安, 李厚祥, 等. 单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 57-62. (Liang Zhengzhao, Tang Chun'an, Li Houxiang, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 57-62. (in Chinese))
- [9] 晏启祥, 杨拯, 何川. 有压圆形隧洞围岩径向裂纹应力强度因子研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 292-295, 306. (Yan Qixiang, Yang Zheng, He Chuan. Study on stress intensity factor of rock radial crack behind circular tunnel under inner water-pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 292-295, 306. (in Chinese))
- [10] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (Cheng Jin, Zhao Shushan. Fracture Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [11] 王炳军, 肖洪天, 党彦, 等. 横观各向同性地基各向异性对应力场影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(6): 40-48. (Wang Bingjun, Xiao Hongtian, Dang Yan, et al. Influence of the anisotropy of a transversely isotropic foundation on additional stress fields[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Edition), 2015, 47(6): 40-48. (in Chinese))
- [12] Yue Z Q. Elastic fields in two joined transversely isotropic solids due to concentrated forces [J]. International Journal of Engineering Science, 1995, 33(3): 351-369.
- [13] 王炳军, 肖洪天, 岳中琦. 半无限横观各向同性介质中多裂纹相互作用分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2527-2535. (Wang Bingjun, Xiao Hongtian, Yue Zhongqi. Interaction between two rectangular cracks in a transversely isotropic medium of semi-infinite extent[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2527-2535. (in Chinese))
- [14] 王炳军, 肖洪天, 岳中琦. 半无限横观各向同性介质中共面双裂纹边界元分析[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 494-499. (Wang Bingjun, Xiao Hongtian, Yue Zhongqi. The interaction of two coplanar cracks in a transversely isotropic half-space[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(4): 494-499. (in Chinese))