DOI：10.11779/CJGE2024S20003

磁场提升电渗加固效果的试验探究

徐朝阳[1]，周 建*[1]，周吾桐[1]，蒋熠诚[1]，朱则铭[1]，余锦地[2]
(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心，浙江 杭州 310058；2. 浙江省水利水电勘测设计院，浙江 杭州 310002)

摘 要：通过改善界面电阻来优化电渗效率受到了广泛关注。基于磁电化学研究，开创性地将磁场引入电渗过程中，旨在降低界面电阻并提高电渗效率。通过试验证明引入磁场能显著提高电渗效率，且最佳的布置位置为阳极处。具体而言，合理布置磁场能够大幅延缓阳极界面电阻的上升，改善电渗排水性能，大幅缩短了处理时间。能耗方面，采用了多个指标进行综合分析，包括等效能耗、总能耗、能量利用率，结果表明引入磁场是解决电渗高能耗问题的有效途径，尤其当磁场布置在阳极处，能大幅提高能量利用率并减小总能耗。其中，采用可重复使用的永磁体作为磁极，能够循环使用且成本低廉。因此，在客观上，电渗中引入磁场的技术极具工程应用潜力和实践价值。

关键词：电渗；磁电化学；磁场；界面电阻；能耗
中图分类号：TU472.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-4548(2024)S2-0077-05

作者简介：徐朝阳(2000—)，男，硕士研究生，主要从事软基处理方面的研究工作。E-mail: 22212005@zju.edu.cn。

Experimental study on enhancing efficiency of electroosmotic reinforcement with magnetic field

XU Chaoyang[1], ZHOU Jian[1], ZHOU Wutong[1], JIANG Yicheng[1], ZHU Zeming[1], YU Jindi[2]
(1. Coastal and Urban Geotechnical Engineering Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hangzhou 310002, China)

Abstract: The optimization of electroosmotic efficiency by improving interface resistance has received widespread attention. Based on the researches on magneto electrochemistry, a magnetic field is innovatively introduced into the electroosmotic process, aiming to reduce interface resistance and improve electroosmotic efficiency. Through experiments, it is demonstrated that introducing a magnetic field can significantly improve the efficiency of electroosmosis, and the optimal placement is at the anode. Specifically, a reasonable arrangement of magnetic fields can significantly delay the increase in anode interface resistance, improve the electro osmotic drainage performance, and significantly shorten the processing time. In terms of energy consumption, multiple indices are employed for comprehensive analysis, including equivalent energy consumption, total energy consumption and energy utilization rate. The results show that introducing a magnetic field is an effective way to solve the problem of high energy consumption in electroosmosis, especially when the magnetic field is arranged at the anode, and it can significantly improve energy utilization rate and reduce total energy consumption. Among them, the reusable permanent magnets are used as magnetic poles, which can be reused and have low cost. Therefore, objectively speaking, the technology of introducing magnetic fields in electroosmosis has great engineering application potential and practical value.

Key words: electroosmosis; magnetoelectrochemistry; magnetic field; interface resistance; energy consumption

0 引 言

电渗法因其能耗过大在工程应用推广上受到诸多限制。最新研究结果表明，降低电极与土壤界面的电阻，可以有效解决电渗法能耗过大的问题，并且显著提升电渗的效率[1]。

电化学领域中已经开发了多种成熟的技术来降低界面电阻。其中，磁电化学技术因其出色的性能引起广泛关注。当施加垂直于电场的磁场时，电解液中会产生对流，这一效应能够大幅提高传质在电极表面的交换速率，进而减小界面电阻[2]。这种磁场效应被称为“磁流体动力学效应”（MHD），主要由电磁场激发的洛伦兹力而产生[3]。Weier 等[4]使用数字粒子图像测速仪（DPIV）直接观测了 MHD 对流引起的速度场。他们发现电解过程中的传质交换会受到磁场的显著影

基金项目：国家自然科学基金项目（52078455, 51708507）；浙江省水利厅科技技术项目（RA2012）
收稿日期：2024-06-21
*通信作者（E-mail: zjelim@zju.edu.cn）

响。Olivas 等[5]通过理论推导和数值模拟研究发现磁场的 MHD 效应可以有效提高电镀的效率。此外，Angulo 等[6]对水电解的研究进行了全面概述，指出磁场可以降低活化、欧姆和浓度过电位。如今，磁电化学已在多个领域得到了很好的应用。

理论上来看，由于电场是电渗的固有特征，同样地引入垂直磁场也可以激发洛伦兹力，产生 MHD 效应，进而降低界面电阻，提高电渗效率。而且，永磁体成本低，操作便捷，只需置入土体中就能发挥作用。简言之，客观来讲，将磁场引入电渗系统中是极具可行的方法。因此，本文设计了一系列的试验，并基于界面电阻指标、排水指标、能耗指标客观评估了在电渗中引入磁场的潜力。

1 试验材料和方法

1.1 试验土样

本研究中采用的土样取自中国浙江省杭州市西湖区某基坑工程，为典型的杭州地区黏性土，原状土的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 试验土样基本物理性质

Table1 Physical parameters of test soil

含水率/%	土粒相对质量密度 G_s	孔隙比 e	电导率/($S\cdot m^{-1}$)	液限 w_L	塑限 w_P	渗透系数 k/($cm\cdot s^{-1}$)
58.5	2.74	1.470	0.16	45	24	1.2×10^{-9}

将原状土烘干磨细后，重制成含水率为 85%左右的土样，然后装入试样模型盒中制成试验样品。

1.2 试验装置

图 1 是自主研发的室内电渗试验装置的示意图。其中，模型盒的长、宽、高分别为 20，10，10 cm。在模型盒两侧放置电极板，土工织物布置在电极后面，以防止土颗粒逸出。阴极槽的底部设置有排水孔。烧杯和天平放置在孔下方，用于收集和监测排出液。

南北磁极都分别由两块 N52 磁铁组成，表面磁场强度为 0.22 T，单个磁铁的长、宽、高分别为 5，5，3 cm。该场强能有效引起液相的对流运动[7]。

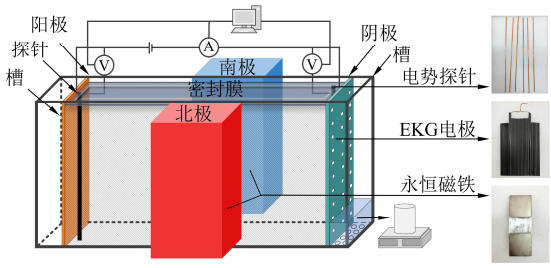


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test devices

本研究中采用的电极和电势探针为常规电渗室内试验材料。电源电压为常规输出电压 30 V[1,8]。

1.3 试验方案

如表 2 所示，为了探究磁场的最佳布置方案，本研究将磁极置于不同位置，进行系统性的试验研究。

表 2 试验方案表

Table 2 Test schemes

试验编号	电导率/($S\cdot m^{-1}$)	含水率/%	磁极布置位置	磁场强度/T	通电时间/h
A1	0.276	84.8	—	0.22 T	24
A2		85.1	阳极		
A3		85.2	阴极		
A4		84.7	土体		
B1	0.211	85.1	—		
B2		84.5	阳极		
C1	0.108	84.2	—		
C2		85.2	阳极		

表 1 中，A1、B1、C1 是各组相应的对照组，没有布置磁场，因此可以作为基准参考线。其余各组都是试验组，磁场从通电开始就布置在特定位置一直到结束。在磁场方向上，如图 2 所示，本研究采用了相关文献的布置方式[3]。这样的电磁场布置方式会产生向上的洛伦兹力，更有效地抑制界面电阻的上升。

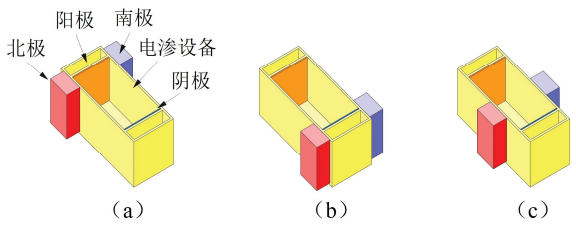


图 2 磁场布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of layout of magnetic field

A 组的试验结果表明，磁场最佳布置位置在阳极。因为含盐量大小影响了电场在土体中的传递。基于此，本文探讨了含盐量因素对磁场作用效果的影响。室内试验中常用的土体电导率介于 0.1 至 0.3 S/m[1, 8]。因此，本文采用 NaCl 溶液将土体电导率调至 0.211 S/m（B）和 0.108 S/m（C）进行试验。电导率由 Rayleigh DJS-1C 高精度仪器测定。

进一步地，本文通过高精度数字万用表的监测数据，并根据欧姆定律测算了阳极界面电阻。此外，排水指标是最为直接可靠的判断依据，本文设置的排水监测系统能每隔 10 min 记录累积排水量的变化。

2 试验结果与分析

2.1 界面电阻

土体-电极界面的电阻可以在一定程度上反映电渗过程中的实时变化情况[1]。有必要对该指标进行分析，进而客观评估磁场作用对电渗的影响。

如图 3，A 组阳极界面电阻的变化具有一定的规律性。在通电后的前 12 h，各组的电阻变化并不明显。之后，各组界面电阻出现不同程度的增加。A1～A4 的最终电阻分别为 16.54，28.62，21.63，17.07 Ω。相比于对照组 A1，阳极布置磁场的 A2 增长最为明显，其次是阴极布置磁场的 A3，而土体处布置磁场的 A4 没有明显差异。结果说明在电极处布置磁场会对阳极界面电阻产生显著影响。

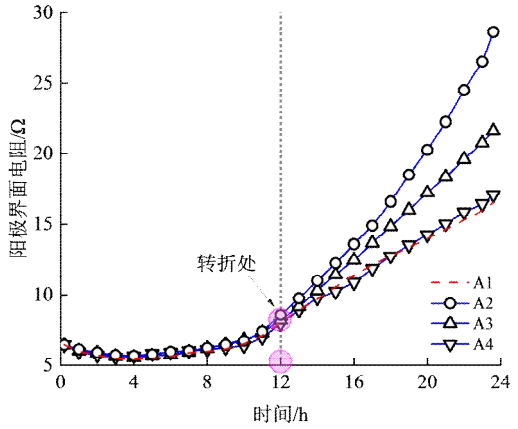


图 3 阳极界面电阻随时间变化

Fig. 3 Variation of anode interface resistance with time

上述的观察结果可能会得出这样的结论：磁场会导致阳极界面电阻的快速增加。然而，电渗中的电化学参数变化必须考虑土体中的离子含量和水分含量这两个因素的影响[9]。阳离子是土体液相中主要的电荷载体，较高的阳离子浓度代表较好的电化学特性。此外，土体电阻的升高通常与其水分含量的减少有关，而土体电阻的变化又会影响电化学参数的变化。因为本研究中试验材料的初始含水率相似，可以用排水指标来反映土体中的含水率变化。且单位体积的排出液中的离子含量相近，所以排水指标也能反映土体中的离子含量变化。基于此，本文选用排水量作为水平轴，进而更客观地评估磁场对电渗的影响。

图 4 显示了各试验组在相同排水过程中阳极界面电阻的变化。可以明显观察到各试验组电阻处于低值且稳定的持续过程并不相同。A1、A2、A3 和 A4 组的电阻开始上升时所对应的排水量分别为 130，185，150，130 mL。与对照组（A1）相比，阳极布置（A2）延迟了 42.31%，阴极布置（A3）延迟了 15.38%，而土体布置（A4）没有观察到显著差异。结果表明，磁场需要合理布置才能延缓界面电阻的上升，且布置在阳极的效果（A2）最为显著。

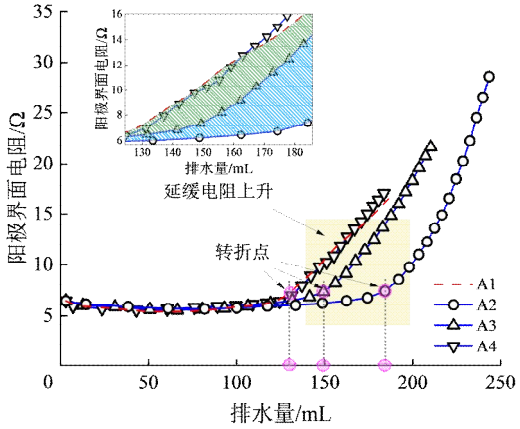


图 4 阳极界面电阻随排水量变化

Fig. 4 Variation of anode interface resistance with drainage volume

2.2　排水速率

磁场效应能有效减缓界面电阻的上升，会对电渗效率会产生积极的影响。如图 5 所示，排水速率的变化趋势呈急剧增加、随后逐渐衰减到稳定。

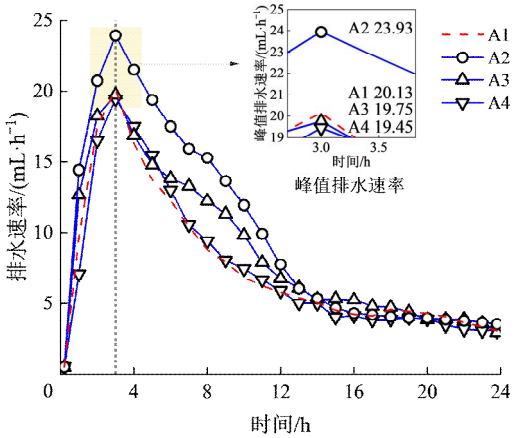


图 5 排水速率随时间变化

Fig. 5 Variation of drainage rate with time

图 5 显示各试验组的峰值排水速率存在显著差异。A1～A4 组的峰值排水量分别为 19.75，23.93，20.13，19.45 mL/h。阳极布置磁场（A2）峰值速率比对照组（A1）增加了 20.91%，而其他试验组（A3、A4）没有观察到明显的差异。

在达到峰值后，A1～A4 的平均排水速率分别为 9.50，13.31，11.03，9.80 mL/h。阳极布置（A2）平均排水速率相较于对照组（A1）增加了 40.08%，阴极布置（A3）平均排水速率增加了 16.12%，而土体布置（A4）没有出现显著增长。上述结果说明磁场的引入能够显著提高排水速率。

2.3　累计排水量

如图 6，A1～A4 的累计排水量分别为 186.11，

243.46，210.29，183.73 mL。相对于对照组 A1，阳极布置磁场（A2）和阴极布置磁场（A3）能提高排水量分别为 30.82%和 12.99%，而土体布置磁场（A4）没有出现排水量增大的现象。结果说明电极处布置磁场能提高排水上限，特别是布置在阳极处。

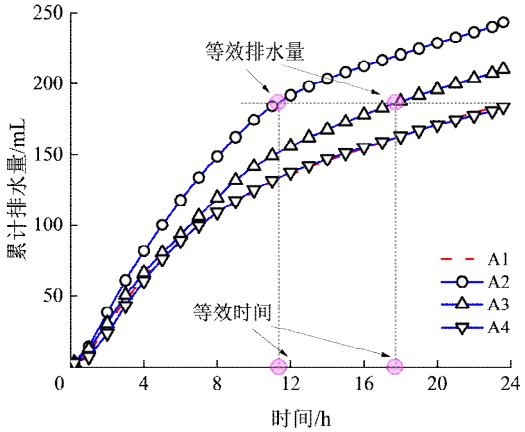


图 6 累计排水量随时间变化

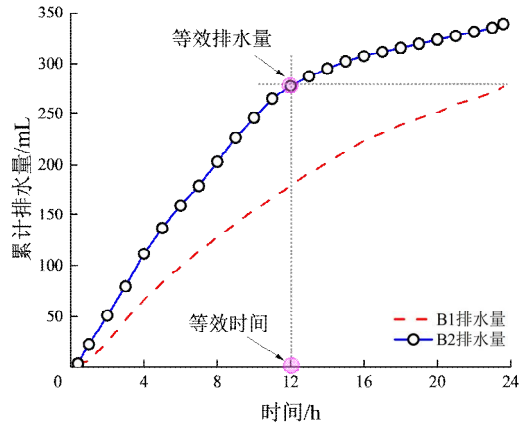
Fig. 6 Variation of cumulative drainage with time

进一步的，电极处布置磁场能够大幅缩减电渗的处理时间。布置在阳极处的效果最佳，A2 在通电后的 11 h 内就能达到对照组 A1 的最终排水量，布置在阴极的 A3 在 18 h 内达到。

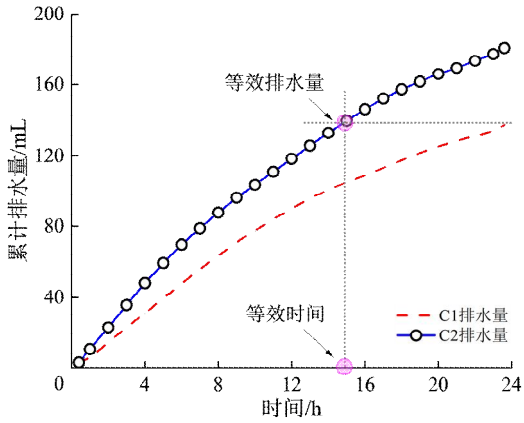
上述结果证明了在电渗系统中引入阳极磁场极具潜力。本文对不同含盐量的试验土样进行进一步研究，以综合评估这一方法。

如图 7 所示，阳极磁场布置的增效作用使得试验组的排水上限都得到了显著提高。与相应的对照组（B1、C1）相比，试验组（B2、C2）的最终排水量分别增加了 22.29%和 31.87%。

此外，达到对照组（B1、C1）的最终排水量，试验组（B2、C2）分别仅需约 12，15 h。与相应的对照组相比，试验组的持续时间分别节省了约 50.00%和 37.50%。这说明对于不同含盐量土体，磁场都能够较好地提高电渗效率，节约时间成本。



（a）B组含盐量为0.211 S/m的排水量随时间变化



（b）C组含盐量为0.108 S/m的排水量随时间变化

图 7 不同含盐量下排水量随时间变化

Fig. 7 Variation of drainage with time under different salt contents

2.4 能耗分析

高能耗仍然是电渗法在实际工程中应用的一个重大障碍。因此，有必要分析引入磁场后的能耗情况。

为了表达更为客观，这里对排水过程进行了标准化，主要反映在参数“t_1”和“t_2”上，如下式：

$$E_1 = \int UI(t_1)\mathrm{d}t_1 \quad 。 \tag{1}$$

式中：E_1 为等效能耗（W·h）；U 为电源输出电压，取 30 V；$I(t_1)$ 为电流（A）；t_1 为试验组排水量达到与对应对照组所需的时间，对照组（A1、B1、C1）的时间为 0～24 h，试验组 A2、A3、A4、B2、C2 的时间分别为 0～11 h、0～18 h、0～24 h、0～12 h 和 0～15 h，如图 6，7 所示。

此外，为了清楚地证明能耗的降低，使用以下公式计算试验组的过剩能耗：

$$E_2 = \int UI(t_2)\mathrm{d}t_2 \quad 。 \tag{2}$$

式中：E_2 为过剩能量消耗（W·h）；$I(t_2)$ 为电流（A）；t_2 为从等效时间到试验结束的持续时间，试验组 A2、A3、A4、B2、C2 的时间分别为 11～24 h、18～24 h、24～24 h、12～24 h 和 15～24 h，如图 6，7 所示。

本文依据式（3）计算了平均能耗系数 α，该系数可以衡量单位排水体积所需的能耗大小[10]。式（3）中，因对照组没有过剩能量消耗，因此表示对应的 E_2 值为零。

$$\alpha = \frac{E_1 + E_2}{V_d} = \frac{\int UI(t_1)\mathrm{d}t_1 + \int UI(t_2)\mathrm{d}t_2}{V_d} \quad , \tag{3}$$

在 A 组中，在电极（A2，A3）处布置磁场不仅显著降低了总能耗，而且提高了能量利用率。与对照组 A1 相比，阳极布置磁场的 A2 使所需的能耗减少了 27.68%，阴极布置磁场的 A3 减少了 10.34%。在能量利用方面，A1～A4 的能耗系数分别为 1.81，1.30，1.57，

1.83 W·h·mL^{-1}。其中，A2 的系数最低，其次是 A3，而土体处布置磁场的 A4 没有显著差异。说明阳极布置磁场能显著提高能量利用率，减小排出单位体积水所需要的能量。

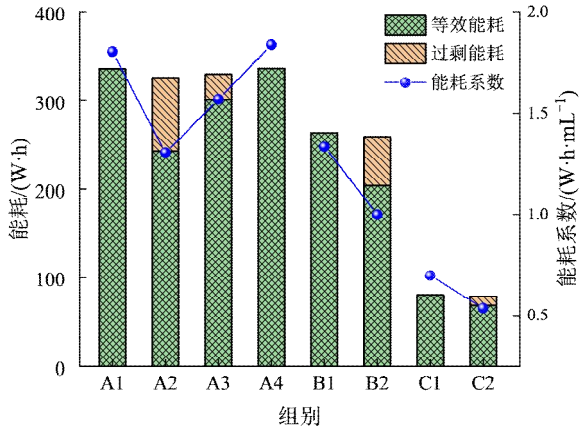


图 8 各试验组能耗分析

Fig. 8 Energy consumption analysis

在其他组（B、C）中，阳极布置磁场的方法同样显著改善了能耗情况。相比于相应的对照组，B2 组减少了 22.81%，C2 组减少了 14.51%。此外，各个试验组的能量消耗系数也出现大幅下降。上述结果证明该方法能有效解决电渗的能耗问题。

3 结　　论

本文主要探讨了在传统电渗框架内引入磁场的可能性。通过室内试验和各类指标的分析，得出以下 3 点结论。

（1）经过对阳极界面电阻的全面分析，在电极处引入磁场能显著缓解阳极界面电阻和阴极界面电阻的上升，且在阳极处布置磁场能达到最佳效果。

（2）排水参数表明，在电极处放置磁场能显著提高排水效率，且置于阳极处的效果最佳。多组试验表明阳极磁场能显著提高排水上限，大幅缩短土体固结时间。

（3）全面分析了引入磁场后的能耗情况，包括能量利用系数、等效能量消耗、过剩能耗。数据表明引入磁场能有效解决电渗高能耗的问题，显著提高能耗利用率，降低排水所需能耗。

磁场在电渗过程中的作用机制尚需深入研究。进一步的研究将关注磁场对界面电化学反应，并探讨电化学反应与土体中离子迁移之间的关系。

参考文献：

[1] 朱则铭，蒋熠诚，周　建，等. 软土电渗中的浓差极化机理与应用试验研究[J]. 土木工程学报，2023，**56**(增刊 1): 142-151. (ZHU Zeming, JIANG Yicheng, ZHOU Jian, et al. Experimental study on concentration polarization mechanism and application in soft soil electroosmosis[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, **56**(S1): 142-151. (in Chinese))

[2] ZHANG Y, LIANG C, WU J, et al. Recent advances in magnetic field-enhanced electrocatalysis[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020, **3**(11): 10303-10316.

[3] GATARD V, DESEURE J, CHATENET M. Use of magnetic fields in electrochemistry: a selected review[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2020, **23**: 96-105.

[4] WEIER T, HÜLLER J, GERBETH G, et al. Lorentz force influence on momentum and mass transfer in natural convection copper electrolysis[J]. Chemical Engineering Science, 2005, **60**(1): 293-298.

[5] OLIVAS P, ALEMANY A, BARK F H. Electromagnetic control of electroplating of a cylinder in forced convection[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2004, **34**(1): 19-30.

[6] ANGULO A, VAN DER LINDE P, GARDENIERS H, et al. Influence of bubbles on the energy conversion efficiency of electrochemical reactors[J]. Joule, 2020, **4**(3): 555-579.

[7] LI Y H, CHEN Y J. The effect of magnetic field on the dynamics of gas bubbles in water electrolysis[J]. Scientific Reports, 2021, **11**(1): 9346.

[8] 蒋熠诚，周　建，甘淇匀，等. 电极反转模式下反转电压对电渗影响试验研究[J]. 地基处理，2022，**4**(增刊 1): 37-44. (JIANG Yicheng, ZHOU Jian, GAN Qiyun, et al. Experimental study on the effect of reversal voltage to electro-osmosis using polarity reversal method[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, **4**(S1): 37-44. (in Chinese))

[9] LAURSEN S. Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, **34**(5): 664-671.

[10] 郑凌逶，谢新宇，谢康和，等. 基于等电势梯度模型试验的滩涂淤泥电渗效率分析[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2018，**48**(3): 557-562. (ZHENG Lingwei, XIE Xinyu, XIE Kanghe, et al. Electro-osmosis efficiency analysis of marine sludge based on constant potential gradient model test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, **48**(3): 557-562. (in Chinese))

（编校：明经平）