

基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究*

刘广明¹ 吴亚坤² 杨劲松¹ 余世鹏¹ 王相平¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243002)

摘要:以孔雀河流域典型地带为研究区域,利用电磁感应式大地电导率快速测定技术探测获得表观土壤电导率数据,构建了基于电磁感应技术的区域尺度剖面分层土壤盐分精确解译模型,精准解译出研究区剖面土壤盐分含量信息,并以此为数据源采用三维普通克里格法解析并评估了研究区土壤盐分三维空间分布特征。研究表明,不同测量位数据的综合应用能够表征剖面土壤盐分信息,构建出的剖面分层土壤盐分解译模型具有较好的精度;研究区不同区位土壤盐分三维分布呈现明显差异;研究区土壤主体属中度以上盐渍化,局部地带属于重度以上盐渍化土壤,需采取有效治理措施对土壤盐渍化进行可靠防控。

关键词:电磁感应 土壤盐分分布 三维空间变异 区域尺度

中图分类号: S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0078-05

Regional 3-D Soil Salt Spatial Variability Based on Electromagnetic Induction Technology

Liu Guangming¹ Wu Yakun² Yang Jingsong¹ Yu Shipeng¹ Wang Xiangping¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2. School of Construction Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Taking typical area of the Peacock River Basin as the study area, apparent electrical conductivity of soil was induced by using electromagnetic technology, and thus layered soil salinity interpreting models were built up. 3-D soil salt distribution was characterized by using 3-D ordinary Kriging method. The profile soil salt information was presented by different operation modes. The layered salinity interpreting models showed good accuracy. Soil salt distributions of different zones in this area were significantly different. Most of soil in study area belonged to moderate salinity, and some local areas were severe saline soil. Thus, the effective countermeasures should be taken to prevent and control soil salinization in this region.

Key words: Electromagnetic induction Soil salt distribution Spatial variability Regional scale

引言

据联合国教科文组织(UNESCO)和粮农组织(FAO)不完全统计,全世界盐渍化土壤面积约有 $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$,占地球陆地面积的7.26%。我国盐渍土壤总面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约占全国可利用土地面积的4.88%,而且当前土壤盐渍化呈现逐渐

加重的趋势。在半干旱干旱区,土壤盐渍化是土壤生态退化主要灾害之一。对土壤盐分剖面及空间变异精确评估是治理盐渍化土壤和防止土壤进一步盐渍退化的前提与关键环节。

电磁感应式大地电导率快速测定技术是目前国际先进的土壤性质评估技术,在土壤理化性质测定方面已经开展了较为广泛应用^[1~5]。目前我国对该

收稿日期: 2012-06-05 修回日期: 2012-12-24

* 国家自然科学基金资助项目(41171178)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903001)和公益性行业(海洋)科研专项经费资助项目(201105020)

作者简介: 刘广明,副研究员,博士,主要从事土壤盐渍化防控与农业水土工程研究,E-mail: gmlu@issas.ac.cn

通讯作者: 杨劲松,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源利用与管理研究,E-mail: jsyang@issas.ac.cn

技术已经有所研究应用^[6-12], 主要集中应用于土壤盐分测定、地下水浅埋区地下水矿化度评价和均质堤坝安全隐患探测等方面。该土壤性质评估技术与其他类似技术相比, 具有原理先进、操作方便、快速高效、精确度高并且不需要探针侵入土壤等显著优点^[13]。

本文利用电磁感应式大地电导率仪, 获取与剖面土壤盐分信息相关的大地表面电导率数据, 并以此为数据源解译获得剖面土壤盐分含量, 利用三维普通克里格法进行三维土壤盐分空间变异特征解析与评价。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于南疆孔雀河流域, 位于东经 85°45′ ~ 86°50′, 北纬 41°11′ ~ 41°32′, 总面积 1 188 km²。年均降水量 64.5 mm, 集中于 6 ~ 8 月份, 多年平均蒸发量 1 996.5 mm。农作物以棉花为主。该区地处干旱内陆河下游, 地表蒸发强烈, 地下水主要以蒸发作用排泄, 并且由于当地土壤母质含盐量较高等复合原因, 导致区域土壤次生盐渍化严重^[14]。

1.2 EM38 - MK2 数据采集

应用 EM38 - MK2 型电磁感应式大地电导率仪进行区域土壤表面电导率信息的采集。在盐渍化地区, 土壤表面电导率主要与土壤盐分含量相关, 其贡献率大于 80%, 而且贡献率会随盐渍化程度增强而增大^[15-16], 因此在广大干旱易盐区采用电磁感应技术诊断土壤盐渍特征是切实可靠的。

采用网格布点方法, 以 4 km 为测量单元间距, 每个测量单元为 10 m × 10 m, 在研究区共设置 79 个测量单元。在每个测量单元的中心进行 4 种测定位的表观土壤电导率测定, 分别为 0.5H (0.5 m 水平)、0.5V (0.5 m 垂直)、1.0H (1.0 m 水平) 和 1.0V (1.0 m 垂直), 相应分别感应 0 ~ 0.6 m、0 ~ 1.2 m、0 ~ 1.2 m 和 0 ~ 1.5 m 深度的土壤电导率信息, 所获得的表观电导率分别用 $E_{c0.5Ha}$ 、 $E_{c0.5Va}$ 、 $E_{c1.0Ha}$ 和 $E_{c1.0Va}$ 表示。各测定点坐标采用较高精度 GPS (型号为 Trimble Pro XRS) 定位技术确定, 采样时间为 2010 年 9 月。

在每个测量单元中心位置, 按 [0, 10]、(10, 30]、(30, 50]、(50, 60]、(60, 80] 和 (80, 100] (cm) 进行分层采样。为保证样品具有足够的代表性, [0, 10]、(10, 30] 和 (30, 50] 3 层土样为测量单元中 5 点梅花采样混合样品。采集的土壤样品带回实验室内自然风干, 磨碎、过 2 mm 筛后备用。从采集的土样中选取 300 个土壤样品, 按土水质量比例 1:5 提取浸提液, 测定其电导率 E_c , 其中 150 个土

壤样品测定其全盐含量, 测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[17]。

1.3 研究方法

采用三维普通克里格法进行土壤盐分含量三维分布的估值与模拟。三维普通克里格插值法是在给定一个随机过程实测值的条件下, 得到该过程的无偏最优估计。它是一种局部估值的加权平均, 通过半方差函数确定各实测点的权重。三维克里格必须在三维空间上进行采样, 并进行三维方向上的半方差分析。首先计算水平 ($X - Y$ 方向) 和垂直 (Z 方向) 半方差并拟合, 然后组合水平、垂直方向半方差建立 3-D 半方差函数, 最后采用普通克里格法进行三维空间插值。计算原理和步骤参照文献^[18]。

首先用 EM38 - MK2 测定表观土壤电导率, 结合应用土壤盐分解译模型, 计算得到采样点各层土壤盐分含量, 利用 GIS 软件建立采样点盐分 3-D Scatter Data 模型并成图 (图 1), 并以此建立研究区域土壤 3-D Mesh Data 模型, 进而形成研究区土壤的三维空间结构模型图 (图 2), 再利用 GIS 软件 Interpolation 工具进行三维普通克里格土壤盐分空间插值估算。考虑到垂直方向的变化范围较小, 为获得更佳的可视化效果, 绘制的三维分布图中垂直方向均扩大 10 000 倍。

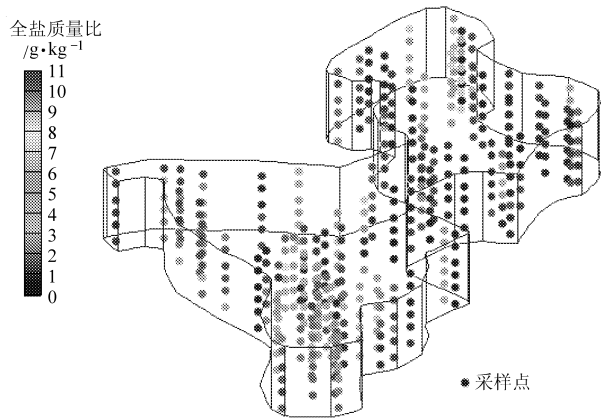


图 1 研究区三维散点及土壤盐剖面分布图
Fig. 1 Distribution of 3-D scatter data and soil salinity in study area

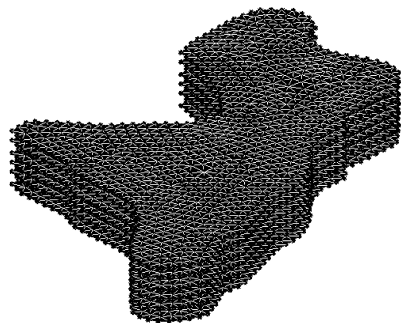


图 2 研究区域 3D Mesh Data 模型图
Fig. 2 3-D Mesh Data model of study area

1.4 分析软件

本文在数据处理与成图过程中应用了地质统计软件 GMS 和 SPSS 软件包,其中 SPSS 主要用于统计特征值分析,GMS 主要用于三维普通克里格插值和三维分布图绘制。

2 结果与分析

2.1 剖面分层土壤电导率解译模型

以面域调查获得的 79 个剖面数据为样本总体,分别以 4 种测定位下的土壤表观电导率($E_{c0.5Ha}$ 、 $E_{c0.5Va}$ 、 $E_{c1.0Ha}$ 和 $E_{c1.0Va}$)、原位采样经室内分析测定获得的 0 ~ 30 cm 土壤水分含量(质量浓度 θ , g/cm^3)、各层土壤粘粒含量(质量比 γ , g/kg)、各层土壤有机质含量(质量比 ρ , g/kg)等为自变量,以各土层电导率为因变量,应用逐步回归方法筛选出测

定各土层电导率 E_c 的主导作用因子并构建自变量参数体系,构建出多因素逐步回归模型以对研究区土壤电导率进行精度解译(表 1)。由表 1 可知,各层土壤电导率解译模型均具有良好精度,相关系数都在 0.98 以上,达到 0.1% 极显著水平($P < 0.000\ 1$, $N = 79$, $R_{0.001} = 0.349$);各层土壤盐分均明显受到土壤水分含量和粘粒含量的影响,而土壤有机质与土壤盐分含量之间没有呈现出明显的相关性;各层土壤盐分均表现出与 $E_{c0.5Ha}$ 和 $E_{c1.0Ha}$ 显著的相关性,这应当与 EM38 - MK2 型电磁感应式大地电导率仪相应 2 种测定位下的土壤表观电导率的响应深度有关;各层土壤电导率解译模型的形式非常相似,并且各模型的参数类型亦基本一致,说明 0 ~ 100 cm 各层土壤盐分测定值的主导影响要素及其影响规律是相近的。

表 1 不同深度土壤电导率解译模型
Tab.1 Interpreting models of soil electrical conductivity in different depths

深度/cm	解译模型	R
0 ~ 10	$E_c = 3.318\ 4 + 26.513\ 9\theta - 0.043\ 0\gamma - 0.870\ 9E_{c0.5Ha} + 1.752\ 8E_{c1.0Ha}$	0.986\ 1
10 ~ 30	$E_c = 1.879\ 7 + 29.676\ 5\theta - 0.040\ 5\gamma - 0.865\ 7E_{c0.5Ha} + 1.750\ 0E_{c1.0Ha}$	0.987\ 0
30 ~ 50	$E_c = -0.082\ 2 + 32.691\ 2\theta - 0.035\ 2\gamma - 0.862\ 2E_{c0.5Ha} + 1.747\ 1E_{c1.0Ha}$	0.987\ 4
50 ~ 60	$E_c = 2.067\ 2 + 29.255\ 1\theta - 0.040\ 9\gamma - 1.011\ 2E_{c0.5Ha} + 0.213\ 0E_{c0.5Va} + 1.656\ 5E_{c1.0Ha}$	0.987\ 6
60 ~ 80	$E_c = 6.403\ 9 + 26.965\ 3\theta - 0.056\ 0\gamma - 0.839\ 1E_{c0.5Ha} + 1.723\ 3E_{c1.0Ha}$	0.988\ 4
80 ~ 100	$E_c = 6.144\ 7 + 24.278\ 7\theta - 0.048\ 1\gamma - 0.830\ 8E_{c0.5Ha} + 1.703\ 6E_{c1.0Ha}$	0.986\ 8

2.2 剖面分层土壤盐分统计特征

为了便于按照国内惯例根据土壤盐分含量对研究区土壤进行盐渍化等级划分,根据土壤盐分质量比为 0.3 ~ 15.0 g/kg 范围内 150 个土壤样品得到的 1:5 土水比浸提液电导率与土壤盐分质量比,建立关系模型为: $Y = 2.530x + 0.550$, $R = 0.904$ (其中 Y 为土壤盐分质量比, g/kg ; x 为 1:5 土水比浸提液电导率, dS/m ; $P < 0.001$);应用本研究建立剖面土壤电导率解译模型(表 1),依据田间测定获得的各测量位土壤表观电导率,结合分析得到的土壤水分和粘粒含量,解译获得各剖面的土壤盐分含量如图 1 所示。各层土壤盐分含量的统计特征如表 2 所示。

表 2 各土层土壤盐分含量的统计特征值
Tab.2 Statistical feature values of soil salinity in different soil layers

土层深度 /cm	最小值 / $g \cdot kg^{-1}$	最大值 / $g \cdot kg^{-1}$	平均值 / $g \cdot kg^{-1}$	标准差	变异 系数
0 ~ 10	0.826	9.279	2.176	1.616	0.743
10 ~ 30	0.606	7.406	2.327	1.623	0.698
30 ~ 50	0.778	7.659	2.481	1.720	0.693
50 ~ 60	0.740	8.798	2.403	1.637	0.681
60 ~ 80	0.732	9.177	2.231	1.643	0.736
80 ~ 100	0.745	10.442	2.295	1.669	0.727

由表 2 知,各层土壤盐分质量比最小值较为接近;最大值范围为 7.406 ~ 10.442 g/kg ,差异较大,并且呈现除表层土壤盐分最大值较高外,随着深度增加土壤盐分最大值显著升高的规律性。从平均值看各层土壤盐分均值差别不大,都在 2.0 ~ 2.5 g/kg 之间,属中度盐渍化土壤。研究区各层土壤盐分都属于中等强度变异。图 2 显示了研究区土壤盐分剖面分布特征,由该图可见:研究区北部与西南部的土壤盐分含量显著高于其他区域;相同剖面的上、下层土壤盐分含量变化相对较大并且下层土壤盐分含量明显高于上层土壤,表明土壤盐分含量随着深度增加而增大,研究区总体剖面土壤盐分分布呈现显著底聚特征。

2.3 三维空间土壤盐分变异插值

利用 GMS 7.1 软件研究了研究区土壤盐分含量的水平和垂直方向的空间变异,水平与垂直方向变异函数如表 3 所示。

由表 3 可以看出,研究区水平与垂直方向土壤盐分含量的块基比分别是 0.144 2 与 0.099 1,都小于 0.25,说明研究区土壤盐分在水平与垂直方向上均具有强烈的空间相关性,土壤盐分的空间变异性主要受到土壤质地、地形地貌、蒸发降水等结构性因

表 3 研究区土壤盐分空间变异函数

Tab.3 Spatial variability function of soil salinity in study area

变异函数	变异函数	块金	基台	块基	变程
方向	模型	值	值	比	/m
水平	指数	0.020 2	0.144 2	0.144 2	34 046
垂直	球状	0.004 8	0.048 4	0.099 1	0.65

素影响。

利用 GMS 7.1 软件进行三维普通克里格插值,得到了研究区三维土壤盐分的空间分布图。由图 3 可见,研究区内土壤盐分含量以轻中度为主,高盐分含量主要分布在研究区北部的西北角与东北角,以及南部的东南部及西南的局部区域,并且这些区域属于重度盐渍化(土壤盐分质量比在 4 g/kg 以上)。出现这种分布特征,与这些高盐分区域邻近孔雀河、地下水埋深比较浅、蒸发强烈并且排水不畅等条件特征密切相关。

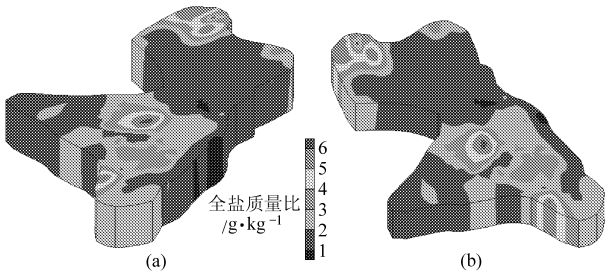


图 3 研究区三维土壤盐分空间分布

Fig.3 3-D distribution of soil salinity in study area

(a) 东南西北向三维视图 (b) 西东向三维视图

根据研究区域土壤盐分含量分布特征,应用 GMS 的截面生成工具(Create cross section),对研究区 3 个最典型截面(图 4 中 A-A'、B-B'和 C-C'截面)的土壤盐分剖面分布特征进行详细解析。

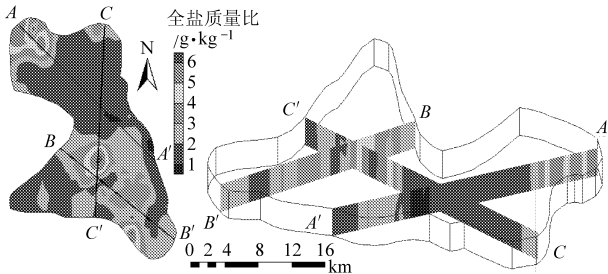


图 4 研究区三维土壤典型截面盐分分布图

Fig.4 Salt distribution of 3-D soil typical sections in study area

A-A'截面的土壤盐分含量的垂向分布与水平分布相似,表现为表层土壤盐分含量高的区域其下层的土壤盐分含量亦相应较高。研究区西北角(A附近),土壤盐分含量较高(质量比大于 4 g/kg),属重度盐渍化土壤,并且表现为上层土壤盐分含量与下层土壤盐分含量无显著性差异,属于均匀型剖面

土壤盐分分布类型;而截面中部,属轻度盐渍化土壤(盐分质量比 1~2 g/kg),上层土壤盐分含量与下层土壤盐分含量无显著性差异,属于均匀型剖面土壤盐分分布类型^[19]。B-B'截面土壤盐分含量的垂向分布与水平分布规律与 A-A'截面相似,亦为表层土壤盐分高的区域其对应下层的土壤盐分含量也较高。并且表现为上层土壤盐分含量与下层土壤盐分含量无显著性差异,属于均匀型剖面土壤盐分分布类型。C-C'截面纵贯研究区的南北方向,土壤盐分含量的垂向分布与水平分布相似,上层土壤盐分含量与下层土壤盐分含量无显著性差异,属于均匀型剖面土壤盐分分布类型。综上所述,研究区土壤盐分含量剖面分布基本属于均匀型剖面土壤盐分分布类型。

参照半漠境及漠境区土壤盐渍化分级标准^[20],根据研究区域 0~100 cm 土壤盐分进行土壤盐渍化分级,即土壤盐分质量分数分别在[0,1%)、[1%,2%)、[2%,4%)、[4%,6%)和[6%,10%),相应盐渍化等级分别为非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化和盐土 5 个等级,各等级盐渍土面积及所占比例如表 4 所示。由表 4 可以看出:研究区只有 0.55% 的土壤未受到盐渍化的威胁,99.45% 的土壤受到不同程度的盐渍化威胁,其中以中度盐渍化面积最大,占总面积的 51.19%;其次是重度盐渍化、轻度盐渍化,还有 1.06% 的土壤已转化成盐土,说明研究区存在严重的土壤盐渍化问题,需采取切实有效的相应治理措施对区域土壤盐渍化加以防控与治理。

表 4 研究区各盐渍化等级面积及比例

Tab.4 Area and ratio of salinization grade in study area

盐渍化等级	面积/km ²	比例/%
非盐渍化	6.48	0.55
轻度盐渍化	411.08	34.58
中度盐渍化	608.46	51.19
重度盐渍化	150.13	12.63
盐土	12.58	1.06

3 结论

- (1) 剖面土壤盐分含量测定值与 EM38-MK2 型电磁感应式大地电导率仪各测量位下测得的表观土壤电导率、土壤水分含量、土壤粘粒含量密切相关,而与土壤有机质含量没有明显的相关性,以主导影响因子为参数体系,成功构建出基于电磁感应原理的内陆干旱区剖面分层土壤盐分精确解译模型。
- (2) 以三维图形方式清晰表达出剖面土壤盐分空间分布,直观地揭示出区域三维土壤盐分空间变

异特征。不同区位土壤盐分含量呈现出不同剖面分布特征,与其距孔雀河的距离紧密相关;研究区主体土壤属于中度以上盐渍化,需采取相应有效措施对研究区土壤盐渍化加以防治。

(3) 三维普通克里格法结合电磁感应式大地电导率快速测定技术,可以实现对区域三维土壤盐分变异特征进行精度解析。本研究为区域尺度土壤盐渍化防控与盐渍生境修复重建提供了技术方法。

参 考 文 献

1 Li Donghai, Guo Qinghua, Patrick J A, et al. Correlation between soil apparent electroconductivity and planthyperspectral reflectance in a managed wetland [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(9): 2 563 ~ 2 579.

2 Prakash N Dixit, Deli Chen. Modification of a spatially referenced crop model to simulate the effect of spatialpattern of subsoil salinity [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 313 ~ 320.

3 Kinal J, Stoneman G L, Williams M R. Calibrating and using an EM31 electromagnetic induction meter to estimate and map soil salinity in the jarrah and karri forests of south-western Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(1): 78 ~ 84.

4 McCutcheon M C, Farahani H J, Stednick J D, et al. Effect of soil water on apparent soil electrical conductivity and texture relationships in a dryland field [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 19 ~ 32.

5 Corwin D L, Plant R E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1 ~ 3): 1 ~ 10.

6 刘广明, 杨劲松, 姚荣江. 基于磁感式探测的分层土壤盐分精确解译模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 61 ~ 66.
Liu Guangming, Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Electromagnetic induction based interpreting model of soil salinity in different soil layers [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 61 ~ 66. (in Chinese)

7 姚荣江, 杨劲松, 赵秀芳, 等. 滩涂土壤电磁感应仪与方差四叉树法采样布局研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 174 ~ 180.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Application of electromagnetic induction (EM38) and variance quad tree (VQT) method on spatial sampling scheme in coastal saline region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 174 ~ 180. (in Chinese)

8 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 等. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用[J]. 土壤, 2003, 35(1): 27 ~ 29.
Liu Guangming, Yang Jingsong, Ju Maosen, et al. Technology of chorometry using electromagnetic induction and its application in agriculture [J]. Soils, 2003, 35(1): 27 ~ 29. (in Chinese)

9 李晓明, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于电磁感应的典型干旱区土壤盐分时空变异快速诊断[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 79 ~ 85.
Li Xiaoming, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Rapid diagnosis of soil salinity temporal spatial variances based on electromagnetic induction in a typical arid area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 79 ~ 85. (in Chinese)

10 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 基于电磁感应原理的堤坝隐患探测技术及其应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 196 ~ 200.
Liu Guangming, Yang Jingsong, Li Dongshun. Based on electromagnetic sensing technology of hidden dyke safety problems and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 196 ~ 200. (in Chinese)

11 刘广明, 杨劲松. 基于电磁感应原理的沿海滩涂地下水矿化度快速测评技术[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 76 ~ 80.
Liu Guangming, Yang Jingsong. Technique for rapid measurement and assessment of coastal groundwater salinity based on electromagnetic inducing theory [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 76 ~ 80. (in Chinese)

12 吴亚坤, 杨劲松, 刘广明. 基于遥感与电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 54 ~ 60.
Wu Yakun, Yang Jingsong, Liu Guangming. Spatial variability of soil salinity using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 54 ~ 60. (in Chinese)

13 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 359 ~ 363.
Li Hongyi, Shi Zhou, Tang Huili. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary krigingmethod[J]. Acta Pedologica sinica, 2010, 47(2): 359 ~ 363. (in Chinese)

14 郭健, 郭琳, 张兵. 新疆孔雀河流域下游平原灌区土壤盐碱化改良的原则与治理措施研究[J]. 地下水, 2011, 33(4): 46 ~ 48.
Guo Jian, Guo Lin, Zhang Bing. Study on the principle of soil salinization improving and its treatment measures in the irrigated downstream plain of the Peacock River Basin in Xinjiang [J]. Groundwater, 2011, 33(4): 46 ~ 48. (in Chinese)

15 Carroll Z L, Oliver M A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity [J]. Geoderma, 2005, 128(3 ~ 4): 354 ~ 374.

16 Sudduth K A, Drummond S T, Kitchen N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 239 ~ 264.

17 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999: 90 ~ 99.

参 考 文 献

1 Igor J Karassik, Joseph P Messina, Paul Cooper, et al. Pump handbook[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.

2 Gülich J F. Centrifugal Pumps[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

3 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.

4 刘厚林,谈明高. 双流道泵[M]. 镇江:江苏大学出版社,2012.

5 Memardezfouli M, Nourbakhsh A. Experimental investigation of slip factors in centrifugal pumps[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(5): 938 ~ 945.

6 杨敏官,查森,林厚强. 超短叶片离心泵叶轮的滑移系数[J]. 流体工程,1991(6):26 ~ 29.
Yang Minguan, Zha Sen, Lin Houqiang. Slip factors for super short vanes of centrifugal pump impeller[J]. Fluid Engineering, 1991(6): 26 ~ 29. (in Chinese)

7 邹正文,史晓燕,徐奇峰. 离心泵叶轮滑移系数的研究[J]. 水泵技术,2006(1):1 ~ 7.
Zou Zhengwen, Shi Xiaoyan, Xu Qifeng. Research on slip factors of centrifugal pump impeller[J]. Pump Technology, 2006(1): 1 ~ 7. (in Chinese)

8 刘厚林,谈明高,袁寿其,等. 离心泵滑移系数精度的比较[J]. 排灌机械,2006,24(6):4 ~ 6,11.
Liu Houlin, Tan Minggao, Yuan Shouqi, et al. Precision comparison on slip factor of centrifugal pumps[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(6): 4 ~ 6, 11. (in Chinese)

9 邓德力. 离心油泵滑移系数的计算[J]. 流体机械,2008,36(5):51 ~ 53,5.
Deng Deli. Study on the formula of centrifugal oil pumps' slip factor[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(5): 51 ~ 53, 5. (in Chinese)

10 陈颂英,庞雷,曲延鹏,等. 考虑边界层堵塞的离心泵滑移系数修正[J]. 山东大学学报:工学版,2009,39(2):75 ~ 77.
Chen Songying, Pang Lei, Qu Yanpeng, et al. Modification of the slip factor of a centrifugal pump considering boundary layer clogging[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(2): 75 ~ 77. (in Chinese)

11 Westra R W, Broersma L, Van Andel K, et al. PIV measurements and CFD computations of secondary flow in a centrifugal pump impeller[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6):061104.

12 Feng J, Benra F, Dohmen H J. Time-resolved particle image velocity (PIV) measurements in a radial diffuser pump[C] // Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009: FEDSM2009 - 78297.

13 Wu Yulin, Liu Shuhong, Yuan Huijing, et al. PIV measurement in internal instantaneous flows of a centrifugal pump[J]. SCIENCE CHINA Technological Science, 2011, 54(2): 270 ~ 276.

14 Liu Houlin, Wang Kai, Yuan Shouqi, et al. 3D PIV test of inner flow in a double blade pump impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 491 ~ 497.

15 杨华,汤方平,刘超,等. 离心泵叶轮内二维 PIV 非定常流动测量[J]. 农业机械学报,2011,42(7):56 ~ 60.
Yang Hua, Tang Fangping, Liu Chao, et al. 2-D PIV measurements of unsteady flow field inside the rotating impeller of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 56 ~ 60. (in Chinese)

(上接第 60 页)

8 Bingwei Song, Hironori Horiguchi, Zhenyue Ma, et al. Rotordynamic moment on the backshroud of a Francis turbine runner under whirling motion[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(7): 071102.

9 倪永燕. 离心泵非定常湍流场计算及流体诱导振动研究[D]. 镇江:江苏大学,2008.
Ni Yongyan. Research on the unsteady turbulent simulation and the flow-induced vibration in centrifugal pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)

10 Christopher E Brennen, Allan J Acosta. Fluid-induced rotordynamic forces and instabilities[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(1):10 ~ 26.

(上接第 82 页)

18 李洪义. 滨海盐土三维土体电导率空间变异及可视化研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
Li Hongyi. Three-dimensional variability and visualization of soil electrical conductivity in coastal saline land[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

19 姚荣江,杨劲松. 基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报,2008,24(3):107 ~ 113.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Spatio-temporal variability of soil salinity in the Yellow River Delta using electromagnetic induction [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 107 ~ 113. (in Chinese)

20 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.