
Current Status and Expectation of Salt Containing Waste Water Discharged from Oil Production and Its Treatment

Wang Lisheng

School of Chemical Engineering and the Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing, China

Email address:

lishengwang@bit.edu.cn

To cite this article:

Wang Lisheng. Current Status and Expectation of Salt Containing Waste Water Discharged from Oil Production and Its Treatment. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 4, 2016, pp. 264-269. doi: 10.11648/j.sd.20160404.21

Received: June 24, 2016; **Accepted:** July 13, 2016; **Published:** August 8, 2016

Abstract: In this paper, we review the current status about the salt containing waste water discharged from oil production. Currently, most of the waste water discharged from oil production in China has not been treated by desalination. Soilsalinization has been an important environment problem. The salt-containing composition and mineralization degree data of reservoir water in major oil and gas fields of China were summarized. It can be seen that the reported data show very different and complex distribution of salt-containing composition of reservoir water. The application of computer simulation can improve the prediction of the analytical data. The predicted data of water and salt concentration in the soil can be used to determine the boundary condition and initial condition of the simulation, and the limit of the sampling can be thus avoided. The results of the study will provide a scientific basis for environmental protection to build the standards of the salt contents of waste water and to prevent secondary salinization of soil of oil fields.

Keywords: Salt-Containing Waste Water from Oil Production, Pollution, Treatment

油田含盐采油废水排放与治理的现状与展望

王利生

化工与环境学院, 北京理工大学, 北京, 中国

邮箱

lishengwang@bit.edu.cn

摘要: 本文调研了国外和我国的高含盐油田采出水的污染问题及其治理的研究现状。文中的资料引用了西方发达国家对油田采出水进行脱盐处理以保护环境的现状与对策。我国对于这个问题也很重视,但在公开文献中尚未见到关于对含盐采油废水进行工业化脱盐处理的报道。关于油田含盐废水排放对环境的危害,特别是导致矿区土地盐渍化的问题,在我国的公开文献中也未见报道。关于高含盐废水渠的排放导致两侧土地盐渍化的研究方法,提出可以借助于电子计算机进行数值模拟,在获得大量分析数据的基础上进行预报,从而弥补单纯靠实地布点采样分析数据在时空范围上的局限性。

关键词: 含盐采油废水, 污染, 治理

1. 引言

石油开采主要经历三个阶段：初期阶段是利用油藏的天然压力开采石油，称为一次采油，其采收率为10%左右；第二阶段是为保持地层压力向油层中注水或蒸汽开采，称为二次采油，采收率能达到35%左右；第三个阶段，即三次采油阶段，在提高石油采收率的方法中我国目前主要采用化学驱的方法，向注入水中加入一定量的水溶性高分子聚合物（如聚丙烯酰胺）增加水相粘度，同时降低水相渗透率，改善油水的流度比，以提高原油采收率。目前，我国各大油田经过蒸气驱或水驱开采之后，多数已进入中后期。无论是二次采油或是三次采油，由于地层中通常自然存在大量的盐类，同时在地层中仍有大量的原油由于出水严重而采收率不高，注入的水就会在地层中形成高浓度的含盐废水伴随原油一起被采出。在采油污水处理站目前的污水处理过程中（详见下节），尚未有对污水进行脱盐的工艺，国家的污水排放标准中也未有含盐量的排放标准，这就导致了油田排放含盐采油废水的问题。近年来，人们发现含盐废水经排污渠的排放已经导致渠道两侧土地出现了次生盐渍化等环境问题。开展高含盐采油废水排放及其致矿区土地盐渍化的研究，为油田高含盐废水排放标准的建立和排放量控制提供依据具有重要意义。

2. 高含盐采油废水处理及其致矿区土地盐渍化的研究现状

表1列出了我国各地典型油矿的储层盐水中主要离子含量及矿化度[1-8]。表1的数据显示我国各地油田地层水盐含量和矿化度差别很大，成份复杂，所含盐类其阴离子以氯离子和硫酸根离子为主，阳离子则主要是钠、钾离子，此外钙、镁离子的含量也比较高。地层水的矿化度以塔里木盆地最高，其范围为22~320g/L。由表1可见，油田采出水一般无机盐含量较高，排放浓度从几万甚至能达到几十万mg/L。

以我国胜利油田现河采油厂为例，该采油厂王家岗污水站位于东营市东城区西南10km处，1997年建成，污水处理工艺包括气浮、隔油、沉淀等物化工艺，每天处理采出水2万立方米，其中2千立方米回注，其余1.8万立方米外排进入广浦沟，径流约80km进入渤海[9]。王家岗污水站外排污水是典型的高含盐污水，其水质检测数据列于表2[10]。据报道，胜利油田共有污水站52座，目前每天实际处理污水70.4万立方米[11]。在该报道中指出，我国油田目前采用的采油污水处理技术均属于初级处理，未进行脱盐等深度处理，这样大的高含盐废水排放量，对于渤海平原这样的易于发生风暴潮倒灌和地下水海水入侵的生态薄弱地区而言，必然对环境产生巨大的影响，其中首要的生态危机问题就是排污渠两侧土地的次生盐渍化。据另文报道[12]，大庆油田在几十年的油气开发利用和油田建设过程中，使大庆及周边地区的地质环境遭受到了破坏，产生了七类十种，包括土地沙化、草原退化和土壤盐碱化等主要地质环境问题。这些地质环境问题，长期以来未得到足够重视，目前已发展到相当严重的程度，而且还在不断

加剧。大庆市及其周边地区的土地盐碱化面积已经达到50.07万 hm^2 。我国环渤海地区分布着我国的几个大油田，包括辽河油田（盘锦）、冀东南堡油田（唐山）、大港油田（天津、河北）、胜利油田（山东）等，这些近海的陆上油田产生了大量含盐废水，未经脱盐处理直接经渠道排入渤海。由于环渤海地区地质环境本来就十分脆弱，存在严重的地下水入侵、风暴潮致土地盐渍化等生态问题，巨大数量的高含盐采油废水的排放给渤海湾湿地和渤海水质都带来了生态灾难。从理论上分析，高含盐采油废水排放的过程可以从以下两个方面导致污水渠沿线土地的次生盐渍化：①渗漏补给地下水致地下水位升高，经地面蒸散致土地盐渍化；②地下水性质是影响深层土壤盐分分布的重要因素，因此，盐分从污水中直接经渗流扩散、水盐运移过程进入地下含水层，致地下水含盐量升高也是土地盐渍化的主要因素。在互联网上能够获得的常规遥感数据（如LandsatTM等）尚缺乏对地面的穿透能力。尽管我们可以从植被的变化来推测和追溯土壤的盐渍化信息，但遥感数据与土壤水文地质数据尚不能达到相互准确配合。面对这样的问题，我们只有认真做好调查研究，拿出可信度高的分析测试数据使环保部门认识到问题的严重性，并提出解决问题的办法。

油田高含盐采出水的污染问题已经引起了世界各国的重视。近年来，加拿大和美国等国已经对采出水的各种脱盐方法进行了系统研究[13-20]，膜分离技术已经广泛用于含油污水中乳化油、溶解油去除和脱盐的研究与工业化生产，发现纳滤和反渗透特别适用于脱盐。早在1997年，美国在加利福尼亚州的SantaClarita进行了以反渗透单元为核心的采油污水深度处理工艺中试。采油污水经核桃壳过滤、澄清、生物滤池、压滤、离子交换、反渗透处理，主要污染物石油类、TDS（总溶解盐）、TOC、硬度分别由原来的20mg/L, 6000mg/L, 120mg/L, 和5mg/L降到0.1mg/L, 145mg/L, 2mg/L, 和1mg/L, 出水达到美国环保局饮用水标准，可用于锅炉给水、农业灌溉和饮用水。我国国家科技部近年来也设立了科技专项，立题开展研究，研究开发了基于纳滤膜技术的油田采出水软化技术，并且进一步用反渗透技术处理软化水，代替清水作为热采锅炉给水，提高污水回用效率，节约清水资源[21]。

采油废水经过一定程度的脱盐处理，能用于作物灌溉，同时不产生土壤积盐问题，是一种较理想的结果。因此，外排污水盐含量标准的确定及其对于沿线生态的影响也是一项重要的研究内容。经过使用含盐水进行农作物灌溉的试验表明，当灌溉水的含盐量控制在一定浓度内，是可以用于农作物灌溉的。据河北省水利研究所在河北省南皮县试区的试验，利用含盐量为2~5g/L的咸水，在小麦拔节后的生长期浇一到两次水，取得了明显的增产效果，而且在一般降雨年份情况下，观测到0~60厘米土体内未发生盐分的累计[22]。这对于油田方面降低废水脱盐的成本并使之实用化也有一定意义。美国盐土实验室提出的灌溉水含盐量划分，当电导率在100~250微西/厘米为低含盐水，可用于灌溉各种作物，一般不需要对土壤进行淋洗，土壤无积盐问题；250~750微西/厘米为中等含盐水，在有适当淋洗措施条件下，可用为各种作物灌溉；而750~2250微

西/厘米为高含盐水,不能用于灌溉[23]。以色列在海水淡化的工业化应用方面处于世界先进行列,目前的海水淡化成本为每立方米淡水0.6美元,这种淡水的氯离子含量仅为20mg/L,被大量用来稀释苦咸水后,实际用于农业灌溉[24]。这为我国今后开展油田含盐废水的处理和利用提供了一个可借鉴的成功范例。

3. 关于针对采油废水排放的土壤环境监测

土壤环境监测是指通过测定影响土壤环境质量因素的代表值来确定环境质量以及环境的变化趋势。土壤环境监测起初在我国主要作为农用地监测[44, 45],用以测定土壤肥力。近年来随着环境恶化,人们逐渐意识到生态环境的重要性,因此农田土壤污染环境监测成为研究焦点。伴随人类生活水平提升,对石油需求量大幅增加,我们对土壤环境的监测的方向也提出了新的要求,其中关于含采

油废水排放的土壤环境监测已经成为一个重要的研究方向。

从研究方法上来看,现今的环境监测主要局限于人工采样和实验室研究[46]。研究方向单一,很难做到以点带面;研究方法的智能化(即与计算机模拟技术紧密结合)尚有待于开展;研究成果缺乏多样性与广泛性。

土壤环境质量标准[44]是以《中华人民共和国环境保护法》为依据,制定的土壤中污染物最高容许量的标准,该标准适用于农田林地等土壤。该标准标准号为GB15618-1995,颁布于1995年,实施于1996年。该标准于2008年进行了修订,修订后的适用范围为农业、居住、商业以及工业四类用地土壤。除扩大适用范围外,该标准将污染物种类从10项增加至76项,并且增加了有机物质量划分。

表1我国主要油气田地层水中的含盐成份和矿化度(表中数字的单位均为g/L)。

地区/井号	Na ⁺ +K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	矿化度	参考文献
塔里木盆地	7.82-88.08		1.18-24.93	0.09-5.81	0.07-4.7	12.41-14.33	0.03-1.58		22-320	1
吐鲁番盆地	10-40		4-4.5	<1	1-2.5	10-78	<1-4.5		2-120	1
酒泉盆地	5.28-39.17		0.83-3.57	0.19-0.77	0.19-1.51	7.77-64.40	0.13-2.01		6.5-70	1
松辽盆地	0.76-3.18		0.01-0.07	0-0.03	0.005-0.412	0.64-7.33	0.64-2.99		0.96-14	1
黄骅盆地	0.37-11.09		0.01-0.33	0.01-1.19	0.05-0.66	0.21-18.88	0.12-2.21		1.30-50	1
海拉尔盆地	0.46-7.20		0.01-0.07	0-0.05	0.03-0.7	0.08-1.2	0.5-16	0.001-0.004	1.74-25	1
鄂尔多斯盆地	0.13-27.61		0.08-58.83	0.02-7.83	0-8.66	0.16-162.9	0.09-1.68		0.93-35.61	2
鄂尔多斯双南油田		1.80	>0.02		0.6	1.6	3		7.2	3
内蒙古桑合油田			0.31	0.12	0.91					4
塔河油田/塔河3.4号(01)	49.6		18.9	2.45	0.23	111	0.26	0.36	>0.20	5
塔河油田/塔河一号(T)	69.6		10.8	1.21	0.312	130	0.14	0.23	>0.20	5
鄂尔多斯油田/陕52	3.76		3.94	0.66	0.354	14.20	0.40	0.0002-1.39	0.02	6
鄂尔多斯油田/陕20	2.05		35.57	3.42	0	103.95	0.33	0.0002-1.39	0.23	6
建南气田/建44(p2ch)		47.20	5.48	0.63	0.40	78.4	2.1		4.47	7
建南气田/建13(c)		9.00	4.18	0.22	0.22	17.7	0.31		1.03	7
大庆油田/朝阳沟阶地P		5.23	0.05	0.02	0.17	7.33	0.96	0.001	13.96	8
大庆油田/朝阳沟阶地F		1.67	0.29	0.03	0.51	2.24	0.84	0.004	5.73	8
大庆油田/大庆长垣p		3.18	0.03	0.01	0.03	3.15	2.99	0.009	9.46	8
大庆油田/大庆长垣Y		0.92	0.01	0	0.55	0.39	0.80	0.006	2.89	8

新西兰先后颁布一系列具有针对性的土壤指导值SGV,并且各地区也颁布各自的土壤指导值SGV。我国的土壤环境质量标准分为一级标准、二级标准以及三级标准,分别以保护区域生态、保护农业生产以及保障农林生产和植物正常生长为保护目标,其对应的标准值分别是背景值、限制值以及临界值。目前我国的土壤环境质量标准还存在一些问题:首先,背景值资料不具有代表性,由于我国地大物博,地域辽阔,且各地土壤性质不同;这些标准值的资料尚难以反映实际和具体的情况,且制定的标准值也存在争议。采油废水在未进行脱盐处理即进行排放将引起排污渠两侧土壤的次生盐渍化,给生态环境带来极大威胁,如上述报道的大庆油田在早期的油田开发与油气利用过程中因采油废水排放所导致的周边地质环境遭受了极大的危害的先例。

由于缺乏含有采油废水土壤的可信度高的数据,因此我们所认知的石油开采对于土壤的污染程度以及污染的持久状态还处于模糊阶段。对于含采油废水的土壤环境监测尚缺乏足够的关注与完善的评价机制,因此未经处理的采油废水直接排放的行为尚未得到及时遏止,采油废水对环境的污染日益加重。要解决这个问题就需要各地环保部门加强油田地区的土壤监测。

含采油废水的土壤监测的重点工作包括:布点采样、制样分析以及土壤环境质量评价。布点采样是研究工作的基础,布点的方法正确与否、采样的过程是否规范也是研究成功与否的关键。目前国内外普遍使用的布点方法为:随机采样法、分区随即采样法、系统网格法[47]。每种方法各有利弊,根据实际研究背景以及研究目的选择布点方法。采样时最需要注意的问题就是深度,只有明确土壤样

品的采集深度, 采取的样品才具有准确性与代表性。在土壤环境质量评价方面, 日本规定土壤质量以浸出液浓度来进行评价。因此只要将浓度与标准值进行对照即可。而我国目前以总量标准进行评价, 在进行判断时会有一些困难。

综上所述, 在国际上, 美国、加拿大油田已经进行了外排废水脱盐处理, 美国盐土实验室已经采用中低浓度盐水成功地灌溉农作物, 以及以色列对已经海水进行淡化后用于补充灌溉水。由于我国的环保部门在国家标准中尚未对外排污水中的矿化度进行规定和限制, 需要通过开展一系列基础研究, 制定将高含盐采油废水的一部分进行脱盐处理以降低排水矿化度的标准。随着海水淡化技术的发展和广泛应用, 已有各种经济实用的脱盐技术和装置可供油田部门选用于污水脱盐。针对高含盐采油废水排放与沿线土地的盐渍化问题相结合开展研究工作, 需要开展的研究和创新之处在于通过对既有的高含盐污水外排过程导致当地次生盐渍化的程度和机制进行观测分析, 研究污水含盐量、外排量、渗漏量等控制参数及其对环境的影响, 分析污水渠道沿线土地盐渍化的时空演变规律, 阐明该类土壤的盐渍化过程及与油田矿区其它正常土地的异同。需要基于上述分析数据进行油田矿区水盐运移动力学模拟和预测, 构建针对油田矿区土壤盐渍化风险控制的污水含盐排放标准和排放量的环境评价机制, 实现区域土壤盐渍化风险评价及预警, 为国家环保部门制定污水矿化度标准和有效防止矿区土壤的次生盐渍化提供科学依据。

4. 关于油田含盐采油废水问题的研究与治理的展望

需要以高含盐采油污水外排渠沿线的土地次生盐渍化问题为研究对象, 通过观测该类渠系对地下水的渗漏和沿线土地地下水水位上升幅度及影响范围, 观测预报渠道沿线土壤次生盐渍化发生的速度。在掌握区域水盐运动机理的基础上开展水盐运移和潜水蒸散过程的数值模拟来揭示区域土壤盐渍化的演变。研究结果可为揭示矿区土壤的次生盐渍化的时空演变规律和当地环保部门对高含盐采油废水处理的决策提供理论依据。需要完成以下几个方面的观测、分析和计算工作:

(1) 排污渠系两侧的土壤次生盐渍化的观测

需观测不同年份、土壤及水文地质条件下渠系外排污水对地下水的渗漏补给量, 和因之引起的地下水水位上升幅度及影响范围; 定量观测排污渠系两侧的地下水水位与矿区其它正常土地的地下水水位的对比, 确定污水渠两侧次生盐渍化的影响范围; 观测矿区土壤次生盐渍化的时空变异, 对表征土壤盐渍化特征的参数, 如土壤的含盐量、pH值、有机质、 Cl^-/SO_4^{2-} 等参数进行布点观测; 实地调查、布点取样观测采集站点附近分层土壤样品的土壤容重、水分特征曲线、扩散度和导水率等水动力学参数, 观测排污渠沿线的降雨入渗、土壤水蒸散变化情况, 为探索土壤水盐运动与转化规律提供依据。

(2) 利用经典水盐运移预测模型和软件, 预报矿区预测年份的排污渠两侧土壤的积盐率分布和盐渍

化范围, 在此基础上绘制矿区的预测年份次生盐渍化分布图。

(3) 以胜利油田现河采油厂外排污水为例, 将结合污水渠沿线各土地单元内的土地利用方式、土壤质地、植被条件、地下水埋深和矿化度等, 根据土壤水盐运移数值模型的计算结果, 分析矿区排污渠沿线土壤次生盐渍化的变化规律, 提出以控制外排污水的盐含量和地下水水位两个方面的具体管理措施来防止沿线土壤的次生盐渍化。

(4) 需要以高含盐采油污水外排渠沿线的土地次生盐渍化问题为研究对象, 通过观测该类渠系对地下水的渗漏和沿线土地地下水水位上升幅度及影响范围, 观测预报渠道沿线土壤次生盐渍化发生的速度。在掌握区域水盐运动机理的基础上开展水盐运移和潜水蒸散过程的数值模拟来揭示区域土壤盐渍化的演变。研究结果可为揭示矿区土壤的次生盐渍化的时空演变规律和当地环保部门对高含盐采油废水处理的决策提供理论依据。为了了解含盐废水在排放过程中在土壤中的入渗从而导致土壤发生盐渍化的问题, 需要开展盐在土壤中潜水蒸散的过程数值模拟。目前常用的软件是Hydrus-1D。

Hydrus-1D是可以用来计算在不同边界制约条件下的水分与盐分运移规律模型软件。模型可忽略空气对土壤内的水流运动的影响, 水流状态满足二维或者轴对称三维的等温饱和一非饱和达西水流条件, 水流控制方程采用的是考虑作物根系吸水因素的修正Richards对流-弥散方程。通过对水流区域进行不规则三角形网格剖分, 控制方程采用有限元法进行求解。

模型有多个详细划分的水流边界模型, 可用以灵活处理各类水流边界, 可供选择的边界条件分为地面边界和下端边界, 地面边界类型有: 定压力水头、大气边界产流、变水头、变水头和通量、定水分通量; 下端边界类型有: 定压力水头、定水分通量、水平排水、自由下渗排水、渗出面、变流量、变地下水水位。水流区域本身可以是不规则水流边界, 甚至还可以由各向异性的非均质土壤组成。在软件中有不同的水含量方程、植物根系作用方程、土壤介质的水力参数的数据库可供选择[25]。总体来说, 关于盐水在土壤中的入渗导致盐渍化的过程数值模拟工作需要进一步开展。

做好本课题的研究需要注意两个关键科学问题:

(1) 高含盐采油废水在流经污水渠的排放过程中, 其含盐量、排放量与渗透量等参数如何影响两侧土地的盐渍化过程? 为此需要获得高含盐采油污水排放渠两侧土地的盐渍化和水盐动力学基本资料, 在此基础上阐明该类土壤的盐渍化过程及与油田矿区其它正常土地的异同。

(2) 当不同含盐量的采油废水在流经不同地区不同土质的排放过程中, 我们对废水含盐量、排放量与渗透量等参数如何分别进行控制? 依据是什么? 废水在排放过程中其沿线土地的盐渍化的时空变异如何? 为此, 需要在获得上述有限的基本分析数据的基础上, 进行不同的油田矿区水盐运移动力学模拟。如果仅仅靠实地采样分析, 我们只能获得非常有限的资料, 特别是不易获得土

地盐渍化过程的预报资料;而通过使用计算机开展数值模拟,我们可以对矿区的水盐运移进行大量的计算分析和预测,从而构建针对油田矿区土壤盐渍化风险评价和控制的污水含盐排放标准 and 排放量的环境评价指标体系。

5. 结论

本文通过总结世界各地油田含盐采油废水的研究现状,提出通过布点采样分析,观测采油污水渠系两侧土地中因含盐污水渗漏而引起的地下水位上升幅度和范围,以及通过实地取样分析获得水动力学参数和土壤盐渍化特征参数,利用水盐运移模型预测矿区排污渠两侧土壤的盐渍化时空变异,确定高含盐采油污水排放对环境的影响,针对大型油田排污存在的共性问题,提出解决该类问题的完整的技术方案,为矿区污水含盐量控制、地下水位控制和盐渍化土壤改良提供科学依据。

致谢

本文为国家自然科学基金面上项目《高含盐采油废水排放导致土地盐渍化的过程数值模拟研究》(41471412)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 霍秋立, 申家年, 付丽, 汪振英, 刘剑营. 海拉尔盆地地层水特征及成因分析[J]. 世界地质, 2006, 25卷, 第2期.
- [2] 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 张爱云. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系地层水与水溶气地球化学特征[J]. 断块油气田, 2001, 8(3), 1-5.
- [3] 黄焕雨. 双南油田储层水水特征分析[J]. 吉林水利, 2007, (9), 27-29.
- [4] 齐春梅. 新场地区气田水化学特征及处理途径研究[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(2), 168-170.
- [5] 周晓芬. 塔里木北部油田水特征离子及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4), 372-374.
- [6] 徐国盛, 宋焕荣, 周文. 鄂尔多斯盆地中部气田水化学条件与天然气聚集[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4), 330-335.
- [7] 潘文蕾, 刘光祥, 吕俊祥. 鄂西渝东建南气田地层水水化学特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3), 295-299.
- [8] 黄福堂. 松辽盆地北部地层水的分类、化学组成与特征研究[J]. 大庆高等专科学校学报, 1994, 14(4), 84-100.
- [9] 李忠堂, 刘娜, 辛迎春. 王家岗高温污水生物处理中试研究[J]. 油气田地面工程, 2003, 22(5), 29-30.
- [10] 赵延茂. 吸附法处理现河首站采油污水的研究[M]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006.
- [11] 汪卫东, 李希明, 蒋淼, 陈勇, 段传慧. 胜利油田污水处理的主要矛盾及对策[M]. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集, 2007, 北京.
- [12] 王立勇, 董学良, 李楠, 陈兴国. 大庆及周边地区地质环境问题现状及防治对策[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 38(1), 177-179.
- [13] Seybold A, Cook J, Rajian R V, et al. Demonstration of dissolved organics removal from produced water, SPE. Production Operation Symposium, Okalahoma City: Society of Petroleum Engineers Inc., 1997, 5-8.
- [14] 许振良, 膜法水处理技术[M], 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [15] 李海波, 等. 含油废水的膜处理技术[J]. 过滤与分离, 2000, 10(4), 10-14.
- [16] 耿爱平, 赵江楼, 反渗透技术在脱盐中的应用[J]. 河南化工, 1998, 12(1), 22-24.
- [17] Bowman R W, Gramma L C, Craycraft R R, Water softening of high TDS produced water. SPE, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Barksfield: Society of Petroleum Engineers Inc., 1997, 143-154.
- [18] Mommaerts G J, Softening of Produced water: which system is best for your application. SPE, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Barksfield: Society of Petroleum Engineers Inc., 1999, 1-11.
- [19] Doran C F, Carini F H, Fruth D A, et al. Evaluation of technology in treat oil field produced water to drinking water or reusequality. SPE, 1997 Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio: Society of Petroleum Engineers Inc., 1998, 811-822.
- [20] Doran C F, Williams K L, Drago J A, et al. Pilot study results to convert oil field produced water to drinking water or reusequality. 1998 Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans: Society of Petroleum Engineers Inc., 1999, 403-417.
- [21] 汪卫东, 李希明, 蒋淼, 陈勇, 段传慧, 胜利油田污水处理的主要矛盾及对策[M]. 中国环境科学学会学术年会优秀论文集, 2007, 北京.
- [22] US Salinity Laboratory Staff: Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, US Depart. Of Agric. Hanb. 60, 1954.
- [23] 河北省水利研究所, 小麦全生长期利用咸水灌溉试验报告[M]. 见南皮试区综合治理旱涝碱的研究, 1981, 84-94.
- [24] Tal A, Seeking sustainability: Israel's evolving water management strategy. Science, 2006, 313, 1081-1084.
- [25] 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.

- [26] 席承藩等译, 盐渍土的发生演变[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [27] Kelley W.P., Alkali Soil. New York: Rinhold, 1948
- [28] 中国科学院南京土壤研究所主编. 中国土壤[M], Beijing, 科学出版社, 1978.
- [29] 张妙仙, 潜水蒸发规律和调控. 中国水利部水利科技的曙光[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1997.
- [30] 李云祯, 姚远, 庞练, 罗伟, 基于VisualModflow的西南矿区土壤的地下水重金属污染评价[J]. 广东农业科学, 2013, (17), 168-171.
- [31] 毛飞, 张桂华, 卢志光, 金之庆, 地下水浅埋条件下冬小麦和大豆土壤水分动态预报模型研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14 (4), 479-486.
- [32] Hu S., Zhao R., Tian C., Empirical models of calculating phreatite vaporating from bare soil in Tarim river basin, Xinjiang. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(3), 663-668.
- [33] 雷志栋, 杨秀诗, 谢森传, 潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J]. 水利学报, 1984, (8), 60-64.
- [34] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东等, 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型[J]. 科学通报, 2006, 50 (S1), 36-41.
- [35] 邵景力, 崔亚莉, 张德强, 基于包气带水分运移模型的黄河三角洲蒸发量研究[J]. 地学前沿, 2005, 12, 95-100.
- [36] 陈启生, 戚龙溪, 有植被覆盖条件下土壤水盐运动规律研究[J]. 水利学报, 1996, 1, 38-45.
- [37] 张妙仙, 毛任钊, 蒸散发条件下农田土壤水盐动态简化模型[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11 (3), 102-105.
- [38] Zimmerman S., Bauer P., Held R., et al. Salt transport on islands in the Okavango Delta: numerical investigations. Water Resources, 29(1), 11-29.
- [39] Nassor I. N., Horton R., Heat, water, and solute transfer in unsaturated porous media: I - Theory development and transport coefficient evaluation. Transport in Porous Media, 1997, 27:17-38
- [40] Hansson K, Lundin L C, Equifinality and sensitivity in freezing and thawing simulations of laboratory and in situ data. Cold Regions Sci. Tech., 2006, 44:20-37.
- [41] Kotzer E., Artificial kidneys for the soil: solving the problem of salinization of the soil and underground water. Desalination, 2005, 185(1-3), 71-77.
- [42] 万良兴, 田军仓, 郑艳艳等, 土壤中水、热、盐耦合运移机理与模型的研究进展[J]. 节水灌溉, 2007, (3), 22-25.
- [43] 李亮, 史海滨, 贾锦凤等, 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (1), 31-35.
- [44] 国家科技保护局科技标准司. 土壤环境质量标准[Z]. 1995.
- [45] 李忠良. 中外土壤环境监测现状及对策建议[J]. 环境经济, 2005, 03:19-21.
- [46] 陈晓冰, 李阳芳. 土壤水分运动方程与参数研究进展[J]. 现代农业科技, 2011, (20):265-268.
- [47] 彭筱峻, 袁文芳, 朱艳芳. 生态环境监测的现状与发展趋势[M]. 江西省宜春市环科所, 2009(2):25-29.