

宁夏盐碱地改良利用研究进展

余 美 ,芮孝芳

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 ,江苏 南京 210098)

摘要 :对宁夏回族自治区盐碱地改良利用的研究成果进行述评 ,主要内容有 :植物耐盐性及耐盐植物的脱盐效果研究 ,盐碱地水盐动态及灌排管理研究 ,劣质水灌溉研究 ,以及水利工程和其他改良措施的应用。在此基础上 ,讨论了该区今后盐碱地改良研究工作的重点领域和需要研究解决的主要问题。

关键词 :盐碱地 ;土地改良 ;宁夏回族自治区 ;综述

中图分类号 :S156.4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2006)06-0085-05

Review of improvement and utilization of saline-alkali field in Ningxia Hui Autonomous Region//YU Mei , RUI Xiao-fang (College of Water Resources and Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Some research progresses in improvement and utilization of saline-alkali field in Ningxia Hui Autonomous Region are summarized , including the study on the salt tolerance of crops and effect of desalination of salt-tolerant crops , the study on the dynamic water-salt variation in saline-alkali field and optimal management of irrigation and drainage , the study on irrigation with saline water , and the study on the functions of water conservancy projects and the application of some soil reclamation measures . Furthermore , some key points and problems needed for further study for improvement and utilization of saline-alkali field are discussed .

Key words : saline-alkali field ; land improvement ; Ningxia Hui Autonomous Region

宁夏回族自治区位于西北地区东部、黄河中上游 , 现有耕地面积 127 万 hm^2 。银川平原是我国最古老的引黄灌区之一 , 它不仅是宁夏回族自治区的农业基地 , 也是全国 12 个商品粮重点生产基地之一。然而 , 该区地处中温带半干旱、干旱区 , 降水稀少 (平均年降水量 292 mm) , 蒸发强烈 (水面蒸发量 1 296 mm) , 当地水资源总量为 11.7 亿 m^3 , 仅占全国水资源总量的 0.04%。环境因素组合的不协调以及人类活动的强烈影响 , 造成了生态环境恶化 , 主要有水土流失、土地沙化、土壤盐碱化、植被退缩、耕地减少且质量下降、大气和水体污染等 , 其中较为严酷的生态环境问题是宁南山区水土流失、中部荒漠化和北部土壤盐碱化。土壤盐碱化是农业生产的一项主要限制因子 , 因此 , 研究土壤盐碱化发生的原因和演化规律 , 探求防治土壤盐碱化的有效措施 , 是改良土壤、提高农业生产的一项重要任务。

1 盐碱土的分布及类型

盐土与碱土以及各类盐化、碱化土壤统称盐渍土或盐碱土^[1]。含有大量易溶性盐分的土壤 , 当其

表层含盐量超过 0.6% ~ 2.0% 时即属盐土 ; 表层含盐量一般不超过 0.5% , 土壤溶液中含有一定量的苏打 , 土壤胶体的交换性钠占交换性阳离子总量的 20% 以上 , 一般 pH 值为 9 或更高的土壤称为碱土。

1949 年以来 , 宁夏引黄灌区 (8 个县市) 的土壤盐渍化调查共进行了 4 次 , 分别在 1957 ~ 1958 年、1962 年、1978 ~ 1983 年和 1985 年^[2] , 调查结果见表 1。从这 4 次调查情况看 , 灌区土壤盐渍化呈下降趋势。1985 年以后 , 在全区范围内再未进行过大规模的土壤盐渍化调查 , 只是 1997 年和 2000 年分别对固海扩灌区和红寺堡灌区进行了土壤盐渍化调查。调查结果表明 , 固海扩灌区的同心、海原和固原土壤盐渍区的面积分别为 2 894.8 hm^2 、2 934.8 hm^2 和 5 949.6 hm^2 , 比 1978 ~ 1983 年全区第二次土壤普查时盐渍区面积分别增加了 2 461.3 hm^2 、1 714.2 hm^2 和 3 161.58 hm^2 。盐池县扬黄灌区在实施灌溉 2 年后 , 也有 220.45 hm^2 土地发生了不同程度的次生盐渍化 , 另尚有 212.1 hm^2 土地处于潜在盐化之中。红寺堡灌区自 1998 年陆续开发以来 , 经过 2 年多的灌溉耕种 , 部分地区已出现土壤次生盐渍化 , 危害相当严

表 1 宁夏引黄灌区 8 县(市)1957 ~ 1985 年间 4 次盐化调查各级盐渍区面积比例%

县(市)	1958 年					1962 年				
	非盐渍区	微盐渍区	轻盐渍区	中盐渍区	重盐渍区	非盐渍区	微盐渍区	轻盐渍区	中盐渍区	重盐渍区
青铜峡	6.89	47.51	27.66	14.23	3.71	15.63	34.02	27.53	13.62	9.20
吴忠	15.98	39.49	32.59	9.82	2.21	2.47	43.98	33.51	5.02	5.03
灵武	3.30	20.00	41.10	26.60	9.00	2.30	25.90	28.80	20.90	22.10
永宁	4.00	46.05	33.34	13.77	2.84	2.99	21.11	37.48	24.63	13.79
银川	2.50	34.49	36.06	24.40	2.55	2.46	38.11	28.35	19.37	11.71
贺兰	3.98	51.84	22.64	17.94	3.60	4.23	33.17	35.07	17.65	9.88
平罗	0.63	38.33	39.16	16.07	5.81	1.26	21.40	30.61	25.37	21.36
惠农	0.50	19.35	62.80	9.80	7.55	0.37	12.57	48.45	27.52	11.09
合计	4.07	39.26	35.59	16.51	4.57	4.34	28.27	33.15	20.66	13.58

县(市)	1978 ~ 1983 年					1985 年				
	非盐渍区	微盐渍区	轻盐渍区	中盐渍区	重盐渍区	非盐渍区	微盐渍区	轻盐渍区	中盐渍区	重盐渍区
青铜峡	39.5	34.9	17.2	6.7	1.7	39.2	34.9	17.1	6.7	2.1
吴忠	32.4	28.1	22.2	11.9	5.4	31.9	27.5	22.8	11.8	6.0
灵武	26.4	26.2	25.5	14.7	7.2	26.3	25.9	24.2	15.0	8.8
永宁	36.2	35.3	18.5	6.5	2.2	36.4	34.4	19.2	7.8	2.2
银川	18.3	23.4	23.4	23.3	11.2	18.4	23.7	23.4	23.8	10.7
贺兰	25.6	26.3	21.4	16.0	10.7	25.6	26.3	21.6	15.9	10.6
平罗	28.4	23.1	25.4	10.4	12.7	28.1	23.4	25.2	12.2	11.1
惠农	14.9	39.9	25.6	14.2	5.4	14.1	39.1	24.5	15.5	6.8
合计	28.8	28.9	22.3	12.5	7.5	28.6	28.6	22.2	13.1	7.5

重。红寺堡灌区土壤总面积 75 972 hm² ,其中无盐化土壤面积占 91.5% ,有盐化土壤面积占 5.5% ,存在盐化威胁的土壤面积占 3% ,这表明自 1985 年以后 ,扬黄灌区的土壤盐渍化面积有所增加。

宁夏的银川以南地区分布的是斑状轻度盐化浅色草甸土 ,以北地区分布的是斑状中、强度盐化草甸土和浅色草甸盐土 ,在地势低洼地区盐土呈大面积分布。由于地形和地下径流流速的差异 ,盐分产生分异作用 ,形成的盐土类型较多 ,诸如蓬松盐土、潮湿盐土、草甸盐土、沼泽盐土、苏打盐土等 ,在封闭洼地还有白僵土。盐渍土盐分主要为氯化物硫酸盐和硫酸盐氯化物 ,其次是重碳酸盐的苏打盐土和白僵土。

2 植物耐盐性及耐盐植物的脱盐效果研究

弄明植物适应的盐渍度 ,即探明其耐盐的适应范围 ,了解其盐分敏感期的耐盐性 ,以便采取相应的管理和栽培措施来减少其根区土壤的盐渍度水平。主要通过土培、水培和田间试验 ,使作物处于不同程度的盐碱化环境中 ,对其萌发期、幼苗期或中后期的耐盐性进行观察分析。

苗济文等^[3-4]对不同盐分胁迫环境条件下小麦、玉米的耐盐效应进行了研究 ,模拟得出其影响效应模型。苗济文等^[5-6]对东北地区的碱茅草在宁夏引黄灌区的适应性、耐盐性及其改土效果进行了详细探讨。李冬等^[7]通过取样分析 ,对不同土壤含盐量下的亚麻生长情况进行比较分析 ,确定了亚麻的耐盐能力。许兴等^[8]通过控制盆栽土壤盐分与田间不同土壤盐度试验 ,研究了宁夏淡灰钙土地区枸杞的

耐盐指标与生理生化反应。王龙强等^[9]通过测定盐地大田种植条件下不同树龄枸杞的主要生理生化指标 ,以探明其在盐渍土壤环境条件下抗盐的特性。张永宏^[10]在宁夏银北盐碱地上种植耐盐植物红豆草、苜蓿、聚合草、小冠花、苇状羊茅的结果表明 ,种植耐盐植物具有明显的脱盐作用。班乃荣等^[11]采用田间对比试验 ,对苜蓿、红豆草、小冠花、细茎披碱草、苇状羊茅、聚合草、甜高粱、羊草、菊苣等不同耐盐植物的脱盐效果进行了比较。

3 盐碱地的水盐动态及灌排管理研究

宁夏引黄灌区长期采用“大引大排”和大水漫灌的落后灌溉方式 ,地表水存在浪费现象 ,地下水开采程度低 ,致使区内大面积的土壤盐渍化 ,生态环境急剧恶化。因此 ,需要建立起排灌结合、井渠结合的地表水与地下水联合开发模式 ,加大地下水的开发利用 ,达到提高水资源利用效率和从根本上治理土壤盐渍化的目的。合理拟定引黄灌溉水、开发地下水和利用沟排水三者的量比关系 ,是引水配水的关键。因此 ,加强研究灌区水、土中盐分的循环、交替、迁移和聚集机理 ,解决宁夏引黄灌区合理利用水资源问题 ,对灌区水盐实施科学调控 ,显得尤为重要和紧迫^[12]。

陈喜等^[13]建立了银北平罗地区水盐平衡动态规划及灌排工程体系合理配置的优化决策模型。对整个区域内未来 10 年引用地表水量、开采地下水量以及相应的配套水利工程井、渠、沟、站进行了规划 ,并对农作物种植品种进行优选 ,同时给出了相应的土壤

含盐量、地下水矿化度变化过程和地下水埋深调控范围。罗代雄等^[14]以银北河西灌区 35 年的水盐变化资料为基础,论述了灌区区域性盐分状况实际处于进排量大体相等的临界平衡状态,分析了水盐平衡状况较差的原因,指出在不断改善自流排水的前提下,加强电排站、机井、暗管排水等强排措施是银北盐渍土改良的关键。陈喜^[15]以宁夏银北平罗地区为例建立了引黄灌区盐碱化预测模型。在利用模型进行水盐动态预报时,首先把平罗地区按水文地质条件和灌溉管理区划分为 17 个子区,找出渠系引排水控制点,再在各分区内进行三角形剖分,然后输入该灌区相应渠道交水点引水量、出水量,各子区内机井开采量,排灌站排水量等资料,就可对灌区土壤中含盐量、地下水位及地下水矿化度的时空变化进行预报。此后,陈喜等^[16]结合平罗灌区的水资源调控问题,把信息处理与计算模型相结合,研制出适用于引黄灌区的水资源决策软件。首先进行资料处理,输入区域内相应的气象、水文、水文地质、地理、地貌、经济等资料,形成一个数据库,然后调用上述资料,运用参数优选模型,求得有关水文地质参数,运用模型可进行预测预报,如根据研究区内进、出水量水质,可预测地下水信息(地下水位、地下水矿化度的变化过程),土壤信息(土壤含水量、土壤含盐量),工程运用信息(机井、抽水电站运行数、运行时间等),灾害信息(农业可能遭受的损失情况以及分布区域)。杜历等^[17]以平罗县东风井渠沟结合调控地下水位的试验为依据,提出了适合银北灌区实际的机井排灌模式,计算模拟了明沟排水、井沟结合排水和暗管排水 3 种措施对地下水位的调控效果。桂林国等^[18]在盐池县柳杨堡乡对旱地的滩地、台地和坡地及水地的高产田、低产田定点进行了土壤水分和盐分动态观测,探讨了宁夏盐池风沙区旱地和水地土壤水分、盐分在农作物生长季节内的动态变化。李福祥等^[19]通过对宁夏惠农县东永固试验区地下水盐动态和土壤水盐剖面分布变化的实际观测,分析得出以蒸发积盐为主要影响因素的银北干旱半干旱地区年内地下水和土壤水盐分运动变化特征,并且就其对春小麦产量的影响和适宜本地区特点的水盐调控措施进行了初步探讨。汪林等^[20-21]指出用水中溶解固体的质量浓度(g/L)和土中盐分百分浓度($\%$)评价灌区积脱盐趋势、盐渍土改良状况,并据其计算水盐的排引比和确定灌区的引排水规模的传统做法,难以揭示产生盐害的实质问题,歪曲了灌区脱盐和土壤改良的真实状况。进而论证了采用 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 质量浓度总量表征的有害盐量指标,能够切中积、脱盐的要害,使盐均衡和土壤盐渍化评估更贴近实际。在阐述银川平原浅层地下水形成及

分布规律的基础上,首次在该区采用国际地下水模型中心(ICWMC)的三维地下水有限差分模型计算了浅层地下水资源量、补排关系和可利用量,提出了银北灌区调用黄河水量、开发利用潜层地下水和利用沟排水的水盐宏观调控意见。动态模拟了 9 套不同规划水平年在不同引水灌溉条件及地下水埋深控制标准下的引、排水方案,提出了不同地区和采用不同方案引用黄河水量和开发利用地下水量的意见。尹大凯等^[22]运用美国盐碱地改良实验室开发的 HYDRUS 程序对青铜峡银北灌区小麦套种玉米地进行了多种灌溉方案下的一维水盐运动数值模拟,研究了基本灌溉模式、井渠结合灌溉模式的改变对不同程度盐碱地改良的效果,提出了适合银北灌区不同盐碱地的灌溉制度。随后,尹大凯等^[23]选取银北有代表性的一个典型区域,建立三维地下水非稳定流模型,用 VisualMODFLOW 软件对研究区域的 4 种灌溉方案进行了数值模拟。汪林、汪珊等^[24-25]以覆盖青铜峡全灌区翔实的水土化学多年动态观测资料为依据,勾画了 3 个时段 9 个化学参数值分布的等值线系列图表,以最高浓度、高浓度区值域范围、最高浓度/最低浓度、浓度场强度、主体浓度为指标体系,揭示了水土化学在局部和全区的分布特点、规律和时空演化态势,以及两者联动演化的异同性,分析了灌区 40 年引排地表水盐量的演化进程。高正夏等^[26-27]分析了青铜峡河西灌区的典型地下水位动态变化特征,探讨了地下水位的变化与农作物生长及土壤次生盐碱化的关系,给出了灌区地下水调控标准,对比分析了渠灌沟排、井渠结合灌溉、暗管排水等灌排模式对降低地下水位、改造盐碱地的作用,以及对水资源利用的利弊,提出适宜青铜峡河西灌区的灌排模式。王文科等^[28]建立了银川平原水资源优化配置模型,计算了不同水平年不同单元防止土壤盐渍化的地下水和地表水配水比例。

4 劣质水灌溉研究

随着宜农荒地的开发、补水扩灌面积的增加,以及工业、城市废水的排放,宁夏的水资源短缺和水质恶化问题已渐突出。主要表现在:①水资源相对不足。全区水资源人均占有量 234.4 m^3 ,属全国最少,即使将国家分配给宁夏的黄河用水量 40 亿 m^3 计入,人均占有量仍不足全国平均水平的一半。②农业灌溉用水利用率低,仅为 42%。③地面水普遍受到不同程度的污染。宁夏段的黄河水质污染逐年加重,诸多有害物质已超过地面水 III 类甚至 V 类标准;非灌溉期部分沟道水体 COD_{Mn} , TP 及挥发酚严重超标,水质为劣 V 类。而宁夏每年经排水沟排出的土

壤深层渗滤水、农田尾水、渠道退水、渗漏水及少量的工业污水和城镇生活污水回归水达 30 亿 ~ 35 亿 m^3 ,且灌溉期 90% 以上沟道水体的水质较好 ,可用于农田灌溉。为了弥补灌溉水资源不足和解决高阶地灌水的困难 ,宁夏部分县市不同程度地抽取排水沟的水进行灌溉 ,目前污灌面积已达 1.5 万 hm^2 ,并有增加的趋势。研究劣质水灌溉对土壤、农产品质量的影响将对有关部门科学合理地利用黄河水资源、污水资源 ,大力推广节水灌溉农业 ,保护农业环境有重大意义。

陈聆东、马云瑞、王杰等^[29-31]对宁夏青铜峡灌区主要排水干沟回归水中的 20 种成分分 2 组生态指标进行评价 ,提出了利用回归水的“三控论”灌溉制度。马云瑞等^[32-33]通过利用低矿化度回归水的土柱模拟实验和盆栽试验表明 :在排水较好的条件下 ,含盐 1.3 ~ 1.6 g/L 的低矿化度回归水灌溉可使中轻度盐渍化土壤脱盐 ,长期纯灌回归水 ,土壤可能向钠、镁碱化过程发展。如果采用混灌轮灌 ,控制好灌溉时间 ,回归水是开发可利用的。孙正风等^[34]根据宁夏污水灌溉区的分布特点 ,重点对中卫县镇罗灌区(污水自流灌溉)、灵武市临河灌区(污水扬水灌溉)、贺兰县新平灌区(银新干沟污水-汉延渠水混合灌溉)的灌溉水质、土壤、农产品(小麦、水稻)质量进行了分析评价。雍富强等^[35]以宁夏众多沟水灌溉示范区的试验结果为依据 ,总结出在土壤含盐量较高的中低产田或新开发的盐碱荒地 ,利用沟水种稻具有冲洗改良盐碱地的作用。在沟水矿化度小于 1 g/L 且无工业污染时 ,可利用沟水种植旱作物。

5 水利措施及其他改良措施

水利措施是 1950 年以来宁夏回族自治区改良盐碱土所采用的最主要的技术措施。50 多年来 ,水利工程技术走过了 20 世纪五六十年代以明沟为主要排水体系的灌排改良盐碱土技术、70 年代竖井强制抽排技术、80 年代竖井与排水沟相结合的排水洗盐技术 ,到 90 年代之后的以明沟为主 ,同时辅以竖井与暗沟为特征的综合水利工程改良技术。宁夏引黄灌区共挖干排水沟 32 条 ,长 790 km ,控制排水面积 42 万 hm^2 ,排水能力 580 m^3/s ,打井 5 000 眼 ,兴建排涝泵站 170 座 ,初步形成了沟、井、站相结合的排水体系。

黄震华、何尚仁利用石膏改良白僵土^[12]。马云瑞等^[36]通过对银北地区的惠农县庙台乡和西永固乡的地下水位、矿化度和土壤进行试验观测 ,提出改善灌排措施、开发利用回归水种稻、推广暗管排水、全面推广秸秆还田、全根圈施磷、增施锌肥的盐

渍化综合治理措施。姚予龙^[37]通过对宁夏引黄灌区低洼盐碱荒地的资源条件进行评价 ,提出目前最佳的利用方向是挖塘养鱼造台田 ,建立立体生态农业体系。李明等^[38]在平罗县头闸镇永惠村对几种不同的盐荒地旱作改良农艺措施的抑盐效果进行了田间试验研究 ,结果表明综合应用伏泡、秸秆还田、深翻、冬灌、顶凌洗盐、春季秸秆盖田等措施 ,可获得较好的改土抑盐效果。刘团结^[39]在平罗县永惠村进行井水种稻试验 ,结果表明井水灌溉对水稻产量无较大影响 ,利用井水灌溉种稻对土壤盐分的淋洗有积极的作用。

6 宁夏盐碱土改良利用研究展望

尽管宁夏回族自治区的盐碱土改良利用研究取得了较大成果 ,但与我国盐碱土研究总体相比还存在一定差距。笔者建议该区土壤盐渍化的研究 ,以盐碱土的形成、分布和演变规律为基础 ,重点开展以下几方面的研究 :①盐渍化与可持续农业及生态环境作用的影响 ;②盐渍化地区灌排管理与劣质水的利用 ;③土壤盐渍化的评估与测量技术 ;④盐渍土水盐动态及溶质运移 ;⑤植物耐盐性及耐盐耐旱作物品种的应用 ;⑥盐渍土的开发利用及改良技术 ;⑦盐渍土形成、演变及地球化学作用 ;⑧盐渍化与荒漠化的演替规律与防治技术等。重点宜放在解决有限水资源条件下对盐碱土改良及干旱区灌溉农业防止土壤盐渍化过程的理论、技术与方法的研究。

6.1 建立区域水盐监测体系

应用 RS(遥感)技术、SGIS(土壤地理信息系统)技术、GPS(全球卫星定位系统)技术等现代信息技术 ,以流域和灌区为单元建立长期的水盐动态监测与预报体系 ,了解盐渍化土壤的分布和演变规律 ,为水盐平衡分析、灌排工程管理 ,以及寻求最佳的宏观生态调控模式、环境保护策略提供依据。近年来 ,我国在不少灌区进行了系统的水盐动态监测。例如新疆的叶尔羌河灌区和渭干河灌区 ,其监测项目包括气象水文要素 ,进入和排出全灌区的、每个骨干灌渠或排水沟控制范围的地表水及地下水的水质和水量 ,灌区内不同位置的地下水位和水质 ,典型地区的土壤含水量和含盐量 ,农作物的需水量 ,农田和裸地的潜水蒸发量等。这些监测项目不仅能正确反映灌区水土盐量的分布 ,圈定非盐渍化土与不同含盐程度的盐渍化土 ,以及适用与不适用于农业灌溉的潜水分布的界限 ,而且对于灌区引黄灌溉水量、开发利用地下水量、沟排水再利用量的配水方案的确定 ,以及含盐程度不同的盐渍化土冲洗水量差异的确定 ,均具有实际意义。许迪等^[40]利用监督分类、NDVI

指数等遥感影像处理方法,在黄河上游的宁夏青铜峡灌区开展了识别作物及土壤盐碱分布的应用研究,体现了遥感技术在监测区域土壤盐碱化的动态变化方面的突出优势。

6.2 水盐动态及溶质运移研究

水盐动态及溶质运移的过程、机理及其建模是盐渍化研究的重要理论基础和核心之一^[41]。今后研究的重点和趋势在于:非均质、非平衡、非饱和水流条件下溶质运移的物理和化学基础,运移过程的定量描述及建模研究;物理和化学非均质土壤中活性溶质运移机理、运移过程及建模;田间大尺度并考虑空间变异条件下的水盐运动规律及建模;运移参数的求取;大小尺度的溶质运移随机模型及其应用;光热、水分、溶质运移的耦合模型研究;基于“3S”技术的水盐运动空间模式化研究;GIS与水资源模型、水盐运动模型的集成。为了应用于生产实践,还需要进行大量的实验观测和数据分析,进一步重视水盐动态及溶质运移规律及其模型在指导盐渍土的灌溉管理、盐渍土的化学和生物改良等方面的应用基础研究。

6.3 盐碱地的灌排管理及劣质水利用

盐碱地的灌排管理及劣质水利用研究的目的是采用合理的灌排模式,充分利用紧缺的水资源,既能满足灌区需水量,又能有利于盐渍土的改良治理。这方面的研究主要包括灌溉水管理及其生态效应;盐碱地灌排设施的配套;基于水盐调控的水资源优化配置(包括灌溉方式和灌溉定额等);微灌条件下盐分积累的控制;劣质水灌溉对土壤的化学和物理特性影响的定量评估;劣质水灌溉的利用途径;持续灌溉农作条件下的盐分平衡等内容。值得一提的是,对于宁夏引黄灌区来讲,排盐出路问题至今仍置于研究视野之外。青铜峡灌区20世纪60~90年代水土累计向黄河排放了5254.9万t有害盐量^[42],这不仅增加了黄河下游水中的盐量,也影响了周边地区的生态环境。因此,在引(扬)黄灌区应加强排盐规划,逐步实施内部消耗盐量的原则,对含盐量高的荒地进行深入调查研究,避免无序开发。

参考文献:

[1] 王春娜,宫伟光.盐碱地改良的研究进展[J].防护林科技,2004(5):38-41.
[2] 潘萍,赵涛,毛立民,等.宁夏土壤盐渍化的动态变化及控制途径[J].宁夏农林科技,2001(5):38-42.
[3] 苗济文,罗代雄,马云瑞,等.土壤盐分对宁夏小麦的影响[J].西北农业学报,1999(4):81-84.
[4] 苗济文,罗代雄,马云瑞,等.地下水位及矿化度对作物

生长发育的影响[J].宁夏农林科技,1996(6):15-17.
[5] 苗济文,王平武.碱茅草在宁夏的适应性及耐盐性研究[J].中国草地,1993(3):32-35.
[6] 苗济文,王平武.盐碱土种植碱茅草的改土效果及效益[J].盐碱地利用,1993(1):9-12.
[7] 李冬,叶力勤,刘春芳,等.亚(胡)麻耐盐能力的研究[J].宁夏农林科技,1997(2):37-38.
[8] 许兴,郑国琦,周涛,等.宁夏枸杞耐盐性与生理生化特征研究[J].中国生态农业学报,2002,10(3):70-73.
[9] 王龙强,蔺海明,肖雯,等.盐地宁夏枸杞生理生化指标及抗盐特性研究[J].甘肃农业大学学报,2004,39(6):611-614.
[10] 张永宏.盐碱地种植耐盐植物的脱盐效果[J].甘肃农业科技,2003(3):48-49.
[11] 班乃荣,陈兴会,张永宏,等.耐盐植物对盐碱地的改良效果试验[J].宁夏农林科技,2004(1):26-27.
[12] 冯锐,苗济文,王平武,等.宁夏盐碱土改良工作50年回顾与展望[J].宁夏农林科技,2000(1):25-30.
[13] 陈喜,施鑫源,刘玉龙,等.银北平罗地区水盐平衡动态规划及灌排工程体系合理配置的优化决策模型[C]//现代水科学不确定性研究与进展.成都:成都科技大学出版社,1994:322-326.
[14] 罗代雄,马云瑞,何尚仁,等.银北河西灌区水盐平衡状况与盐渍土改良关键技术措施[J].宁夏农林科技,1995(1):39-43.
[15] 陈喜.引黄灌区盐碱化预测模型[J].河海大学学报,1997,25(6):92-96.
[16] 陈喜,施鑫源.引黄灌区水资源调控的信息系统研究[J].西北水资源与水工程,1996(1):22-26.
[17] 杜历,鲍子云,洪卫国.银北灌区地下水调控试验示范研究[J].西北水资源与水工程,1995(3):77-83.
[18] 桂林国,曲志正,王峰,等.宁夏盐池沙地土壤水盐动态初步研究[J].甘肃农业科技,1997(6):26-27.
[19] 李福祥,王少丽,方树星,等.宁夏银北干旱半干旱地区水盐动态和调控措施[J].灌溉排水,2001,20(3):41-44.
[20] 汪林,甘泓,于福亮,等.论银北灌区的盐害指标与排引比[J].地球学报,2001,22(1):91-96.
[21] 汪林,于福亮.银川平原浅层地下水资源和盐分调控研究[J].资源科学,2001,23(3):82-87.
[22] 尹大凯,胡和平,惠士博.青铜峡银北灌区井灌井排水盐运动数值模拟[J].农业工程学报,2002,18(3):1-4.
[23] 尹大凯,胡和平,惠士博.宁夏银北灌区井渠结合灌溉三维数值模拟与分析[J].灌溉排水学报,2003,22(1):53-57.
[24] 汪林,汪珊,甘泓,等.宁夏青铜峡灌区水土化学场演化态势初步分析[J].水利学报,2003(6):78-84.
[25] 汪珊,张宏达,汪林.宁夏青铜峡灌区水土盐量的衰减和积聚进程分析[J].水利学报,2005,36(3):365-377.

(下转第94页)

[4] 龙述尧,陈莘莘. 弹性力学问题的无单元伽辽金法[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 66-70.

[5] 介玉新,高波,李广信. 无单元法在混凝土面板堆石坝应力分析中的应用[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2003, 43(8): 1092-1095.

[6] 陈虹,林建华. 用无单元法求解河道水流运动方程[J]. 计算力学学报, 2001, 18(2): 250-252.

[7] 胡德安. 求解几何非线性问题的无单元伽辽金法[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.

[8] 胡云进,周维垣,寇晓东. 三维无单元法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1136-1140.

[9] 周维垣,黄岩松,林鹏. 三维无单元伽辽金法及其在拱坝分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 644-649.

[10] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Crack propagation by element-free Galerkin methods[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 51: 295-315.

[11] 周维垣,寇晓东. 无单元法及其工程应用[J]. 力学学报, 1998, 30(2): 193-202.

[12] 周维垣,寇晓东. 无单元法及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 5-9.

[13] 曹国金,姜弘道. 无单元法研究和应用现状及动态[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 526-534.

[14] 寇晓东. 无单元法追踪结构开裂及拱坝稳定研究[D]. 北京: 清华大学, 1998.

[15] 苑莲菊,李振栓,武胜忠,等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.

[16] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.

[17] 杜延龄,许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.

[18] 党发宁,王晓章,郑忠安,等. 有自由面渗流分析的变单元渗透系数法[J]. 西北水力发电, 2004, 20(1): 1-3.

[19] 葛锦宏,李广信,介玉新. 无单元法在有自由面渗流计算中的应用[J]. 计算力学学报, 2004, 20(2): 241-243.

[20] 曾清红,卢德唐,齐岩,等. 无网格方法求解稳定渗流问题[J]. 计算力学学报, 2003, 20(4): 440-445.

[21] 梁志松,李扬红,吴煌峰. 水工闸基防渗有限元分析与研究[J]. 土工基础, 2004, 18(2): 33-36.

[22] 李广信,葛锦宏,介玉新. 有自由面渗流的无单元法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(11): 1552-1555.

[23] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.

[24] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利水电出版社, 1976.

[25] 李朝红,徐光兴,董淑温. 砌体结构温度应力的有限元分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004, 17(4): 42-44.

[26] 夏世法. 三峡工程大洞径、厚衬砌混凝土施工期监测及温度徐变应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.

[27] 秦雅菲,张伟星. 无单元法在求解平面稳态温度场中的应用[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2003, 24(1): 79-82.

[28] 王国庆. 岩体力学劈裂试验及裂纹扩展的无单元法计算[M]. 南京: 河海大学, 2004.

[29] 寇晓东,杨若琼,沈大利,等. 无单元法在小湾拱坝开裂计算中的应用[J]. 云南水力发电, 2000, 16(1): 71-76.

[30] 曹国金. 无单元的进展、改进及其应用[D]. 南京: 河海大学, 2003.

[31] 胡云进,周维垣,林鹏. 无单元法在三维断裂力学中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 21-24.

[32] 周小平,周瑞忠. 无单元法研究现状及展望[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 12-20.

[33] 唐少武,冯振兴. 关于无单元法的若干注记[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 560-561.

(收稿日期 2005-12-02 编辑:高建群)

(上接第 89 页)

[26] 高正夏,李景波,刘震,等. 宁夏青铜峡河西灌区地下水调控标准研究(一)[J]. 水资源保护, 2003, 4(4): 15-17.

[27] 高正夏. 宁夏青铜峡河西灌区灌排模式对比研究(二)[J]. 水资源保护, 2003, 1(1): 32-35.

[28] 王文科,韩锦萍,赵彦琦. 银川平原水资源优化配置研究[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 36-45.

[29] 陈聆东,张晓燕. 宁夏灌溉回归水再利用的评价[J]. 宁夏农林科技, 2000, 1(1): 34-36.

[30] 马云瑞,张益民,苗济文,等. 宁夏灌溉回归水开发再利用的评价[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 133-138.

[31] 王杰,苗济文,张益民,等. 银川灌区灌溉回归水质量评价[J]. 农业环境保护, 1997, 16(4): 145-148.

[32] 马云瑞,苗济文,张益民,等. 宁夏灌溉回归水对土壤的影响及改良措施[J]. 宁夏农林科技, 1998, 2(2): 18-22.

[33] 马云瑞,苗济文,张益民,等. 宁夏低矿化度回归水灌溉对土壤盐碱化的影响[J]. 农业环境保护, 1998, 17(6): 241-244.

[34] 孙正风,王金保,马京军. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响[J]. 宁夏农林科技, 1999, 4(4): 7-11.

[35] 雍富强,刘学军. 宁夏引黄灌区沟水利用研究[J]. 水资源保护, 2004, 3(3): 17-39.

[36] 马云瑞,苗济文,张益民,等. 宁夏银北地区土壤盐渍化综合治理[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 253-256.

[37] 姚予龙. 宁夏引黄灌区低洼盐碱荒地的开发利用方向研究[J]. 自然资源学报, 1995, 10(4): 364-371.

[38] 李明,陈静,陈兴会,等. 盐荒地旱作改良综合农艺措施抑盐效果探讨[J]. 土壤通报, 2001, 32(2): 60-65.

[39] 刘团结. 银北灌区地下水利用途径的试验分析[J]. 宁夏农林科技, 2004, 4(4): 10-11.

[40] 许迪,王少丽,蔡林根,等. 利用 NDVI 指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8.

[41] 杨劲松. 土壤盐渍化研究展望[J]. 土壤, 1995, 1(1): 23-27.

[42] 汪林,甘泓,汪珊,等. 宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

(收稿日期 2005-07-05 编辑:高建群)