排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 7 月 July 2013 | 第 31 卷 第 7 期 Vol. 31 No. 7

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.07.013

新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素

王少丽[1,2]，焦平金[1,2]，许迪[1,2]，瞿兴业[1,2]
（1. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心，北京 100048；2. 中国水利水电科学研究院水利研究所，北京 100048）


王少丽

摘要：以新疆农七师 125 团灌区为研究对象，基于 169 个点的 2002—2008 年表土层 0～30 cm 的盐分数据，采用统计分析和其他相关分析方法探讨了表土盐分的年际变化特征及其影响因素. 结果表明，2002 年以后面上平均的表土盐分总体呈下降趋势，脱盐率为 18%. 滴灌使用年限、土壤质地、土壤本底盐分状况和地下水埋深对表土盐分有一定影响，但在现有条件下均不及降雨量影响显著. 不同土质表土盐分的变化特征，呈现出轻质土盐分波动幅度大于重质土、轻质土易于积盐和脱盐、重质土盐分变化则较为稳定的特征，而不同滴灌使用年限之间没有明显的差别和规律性. 表土盐分变化与年降雨量之间关系密切，根据年降雨量与近期多年平均降雨量差值和次年表土盐分与当年表土盐分差值，建立了表土盐分与主要影响因素——年降雨量的关系，并提出保持表土盐分稳定的平衡降雨量为 192 mm，以及根据当年降雨量与平衡降雨量的差值预测预报下年度盐分状况及水量调控措施.

关键词：降雨量；浅层土盐分；滴灌；地下水埋深；土壤质地
中图分类号：S275.6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)07-0623-06

王少丽，焦平金，许迪，等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素[J]. 排灌机械工程学报，2013，31(7)：623-628.

Variation trends and influencing factors of shallow soil salinity in arid area of Xinjiang

Wang Shaoli[1,2], *Jiao Pingjin*[1,2], *Xu Di*[1,2], *Qu Xingye*[1,2]
(1. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China; 2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Annual variations of shallow soil salinity and its influencing factors were evaluated by using statistical and other correlation analysis methods in the irrigation district of 125 group of seventh division commander in Xinjiang based on the salinity collected in 0-30 cm soil layer at 169 points during 2002—2008. The results showed that the average soil salinity has been a decreasing trend since 2002, and the desalinization ratio of soil has decreased to 18%. The soil salinity is mainly affected by rainfall, followed by soil texture, service life of drip irrigation installation, soil background salinity and groundwater depth, but all those are not significant compared with rainfall. A wider variation range of shallow soil salinity is observed in light soil than in heavy soil, and the light soil is prone to salt accumulation and desalinization. There is no obvious difference in shallow soil salinity between various service lives of drip irrigation installation. The relationship between shallow soil salinity and annual rainfall is established based on the difference between an annual rainfall and the averaged rainfall over recent years as well as the difference in shallow soil salinity between the next year and this year. With

收稿日期：2012-08-31；**网络出版时间**：2013-07-11
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130711.1120.008.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51079162,51279212)；水利部 948 项目(201119)
作者简介：王少丽(1963—)，女，江苏无锡人，教授级高级工程师，博士(shaoliw@iwhr.com)，主要从事农田灌排理论与技术、农业水环境保护研究.
焦平金(1980—)，男，安徽蒙城人，博士研究生(jiaopj@iwhr.com)，主要从事农田排水与水环境保护研究.

the relationship, 192 mm balance rainfall is proposed to keep shallow soil salinity in stable; further, the soil salinity and water control measurers in the next year can be predicted according to the difference between the rainfall in the current year and the balance rainfall.

Key words: rainfall; shallow soil salinity; drip irrigation; groundwater depth; soil texture

土壤盐渍化是干旱半干旱地区农业发展的主要障碍[1-2]，防治灌区土壤次生盐渍化是干旱区发展灌溉农业中的一个十分重要的任务. 目前国内外学者针对干旱区土壤盐渍化进行了较多地研究，并取得了一系列成果，主要涉及不同节水和改良措施条件下土壤水盐动态[3-5]、盐渍化土地修复与水盐调控技术[6-8]，以及基于遥感与数学模型等研究手段的耕地土壤盐渍化影响评价和模拟等[9-10]，这些研究工作较多针对土壤盐渍化发生过程、机理、防治及合理利用等的适时定位监测试验等，而对区域性的盐分积累、中长期变化趋势及其与影响因素之间关系的研究工作则相对较少.

盐渍土的发生发展受区域性影响因素的制约，探讨其相互关系，并揭示其规律性，对于科学合理地开发利用盐渍土地，具有重大的经济价值和社会意义.

新疆灌区耕地总面积为 $3.987\ 8\times10^6$ hm^2（不包括旱地），其中盐渍化面积为 $1.279\ 0\times10^6$ hm^2，占灌区耕地面积总数的 32.07%[2]. 由于新疆资源型缺水，且时空分布不均，特别是20世纪50年代初大规模开垦后，由于对盐渍化危害认识不足，传统的灌溉方式使灌区地下水位逐渐升高，造成土壤严重次生盐渍化.

为了提高水土资源利用率，近年来，新疆加强了节水灌溉的实施和退耕还林、还草力度. 在一些地区推行的膜下滴灌技术，由于生育期灌溉用水较常规灌溉节省，以及良好的淋盐与驱盐效果，因此得到推广应用，土壤盐渍化的程度有所减轻. 但土壤次生盐渍化仍然是造成该地区大面积中低产田的主要因素，对农业生产形成重大威胁.

文中以气候、地下水、节水灌溉发展等在北疆有一定代表性的新疆农七师125团灌区为研究对象，结合对表土层全盐量普查数据的分析，探讨灌区表土盐分的年际变化特征以及降雨量、土壤质地、土壤盐分状况、滴灌起始时间、地下水埋深等因素对表土盐分的影响. 研究成果旨在为该地区盐渍土的科学管理与改良利用提供参考依据.

1 研究区概况

新疆农七师125团灌区位于新疆北部乌苏县境内，天山北麓，准噶尔盆地西南缘，古尔班通古特沙漠西面，奎屯河下游冲积平原上；南北长45 km，东西宽6～25 km，总面积为460 km^2，可耕地面积为2.87×10^4 hm^2，现有耕地面积为1.17×10^4 hm^2[11].

该灌区属温带大陆性干旱半干旱气候，夏季炎热，冬季寒冷；降水稀少，昼夜温差大；年平均降水量为160.9 mm，年平均蒸发量为1 770.97 mm；年平均温度为6.5 ℃，≥10 ℃活动积温为3 622 ℃；年日照时数为2 623 h，无霜期为164 d. 该区光、热、水资源比较丰富，农业以天山雪水灌溉为主，四周有柳沟水库、奎屯水库和车排子水库环绕，宜于发展灌溉农业.

灌区地势平坦，地面坡降2‰～3‰，灾害性天气和虫害较少，适宜种植多种作物. 目前主要种植作物为棉花、小麦、玉米等，其中棉花面积达80%以上. 区内岩性透水性较差，地下水补给来源丰富，但矿化度高，排水不畅. 1970年以前，地下水排泄方式主要靠地面蒸发，使盐分在土体中积累，加快了土壤次生盐渍化的速度，造成大面积弃耕. 1982—1996年，由于进行了土壤综合治理，挖沟排水治碱，限制引进水量，开发地下水资源，基本上控制了地下水位的快速上升.

2 资料和方法

以125团生产办长年定点监测的面上169个取样点表土层0～30 cm的全盐数据为依据，观测时间为2002—2008年每年春季的4月初，代表每年的初始盐分状态. 采集的土样在实验室内自然风干，磨碎、过2 mm筛，所有的土样均制备1∶5土水比浸提液测定电导率，并换算成25 ℃时的电导率，按当地全盐量与电导率的关系式换算成土壤全盐量. 利用统计分析研究面上平均的盐分动态变化，以及不同土壤盐渍化程度表土盐分变化特征；采用非参数统计检验Mann－Kendall方法（M－K法）对表土盐分的变化趋势进行检验.

研究所需年降雨量数据来自团里的自动气象站观测资料；地下水观测从1991年开始，共有10眼地下水观测井，由于观测井损坏、淤堵或其他原因，

到 2004 年观测井已陆续中止观测. 为了解地下水变化动态,在 1991—2004 年期间,选用其中位于 2,14 连的两眼资料系列较为连续的观测井. 此外 2003 年新建立了几眼观测井,但由于 1—3 月份缺测数据较多,因此选用 2004—2007 年 4 月份的地下水观测数据,描述近年来的地下水埋深动态.

3　结果和分析

3.1　表土盐分变化特征统计分析

2002—2008 年每年 4 月份,全团面上 169 个定位取样点表土 0 ~ 30 cm 盐分统计结果见表 1,表中 n 为样本数量;S_a,S_{max},S_{min} 分别为表土盐分均值、表土盐分最大值和最小值;σ 为表土盐分标准偏差;C_V 为变差系数. 根据新疆地区的盐渍化划分标准[12],以 S(%)表示表土全盐量,$S<0.25$ 为极轻度盐渍化;$0.25 \leqslant S<0.40$ 为轻度盐渍化;$0.40 \leqslant S<0.70$ 为中度盐渍化;$0.70 \leqslant S<1.20$ 为重度盐渍化. 由面上的情况可知,2002—2008 年间,表土盐分均值为 0.20% ~ 0.34%,属于极轻和轻度盐渍化. 而由各点的情况可知,表土盐分为 0.01% ~ 1.28%. 除 2006,2008 年 2 个取样点的全盐最高为 1.28%,1.11%外,各个年份所有取样点的盐分都不大于 1.0%,表明面上有极轻、轻、中、重度各类盐渍化分布,其中以极轻和轻度占多数. 除 2006 年盐分变差系数大于 1.0,表土盐分呈现出较强的空间变异性外,其余年份变差系数均小于 1.0,表土盐分属中等程度的空间变异性. 采用 M - K 法非参数秩次相关检验法计算,得到表土盐分的 U 统计量为 -1.65,表明表土盐分多年变化呈总体下降趋势,但下降幅度不大,2008 年与 2002 年相比,面上表土平均盐分从 0.33%降到 0.27%,脱盐率只达到 18%.

表 1　逐年表土盐分的统计特征值

Tab. 1　Statistical characteristics of topsoil salinity

年份	n/个	表土盐分/%			σ/%	C_V
		S_a	S_{max}	S_{min}		
2002	169	0.33	0.83	0.04	0.23	0.71
2003	169	0.29	0.83	0.01	0.21	0.72
2004	169	0.34	0.82	0.08	0.19	0.57
2005	169	0.27	0.85	0.04	0.21	0.78
2006	166	0.20	1.28	0.01	0.23	1.13
2007	166	0.29	0.91	0.03	0.22	0.76
2008	169	0.27	1.11	0.02	0.23	0.84

3.2　不同盐渍化程度表土盐分变化特征

将土壤普查起始年份 2002 年的表土盐分 S 作为初始值,按极轻盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化将 169 个取样点进行盐渍化程度分级,各分级地块样本容量分别为 77,28,52 和 12,并对不同分级地块的取样点表土盐分进行统计. 图 1 为不同盐渍化分级地块的表土盐分均值的年际变化动态. 由图可知,除极轻度盐渍化地块外,其他盐渍化地块均呈现出下降趋势,采用 M - K 法计算得到极轻、轻、中、重度各分级表土全盐的 U 统计量分别为 0.45, -1.05, -2.25, -2.55,其中中度、重度盐渍化地块盐分下降趋势显著,而轻度盐渍化地块盐分下降趋势不明显,极轻度盐渍化地块盐分略有上升趋势. 由空间上的离散程度可见,极轻、轻、中、重度地块表土盐分年变差系数均值为 0.42 ~ 0.74,属中等程度的空间变异性,并按极轻≈轻 > 中 > 重的顺序变化. 起始盐分较重的重度盐渍化土虽然容易脱盐,但仅仅改变历年各盐渍化级别之间的差异程度,并没有改变各级别之间的大小顺序.

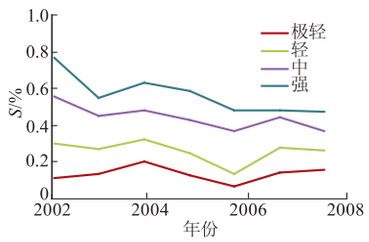


图 1　不同盐渍化级别地块表土盐分的年际变化动态

Fig. 1　Annual variation trend of shallow soil salinity at farm field with different salinization levels

3.3　表土盐分与年降雨量的关系

面上平均的表土全盐量,其宏观动态及相应的年降雨量(P)变化如图 2 所示. 由图可知,当年的降雨量大小和当年表土盐分高低之间没有明显的规律性,但当年较小的降雨量会引起次年盐分上升,而当年较大的降雨量则会引起次年盐分的下降,换言之,丰水年可能引起表土脱盐,枯水年则可能引起表土积盐. 由此定性地表明,当年降雨量大小与来年表土盐分的增减呈负相关关系.

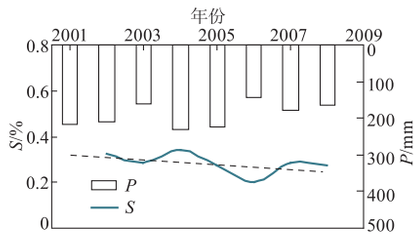


图 2　年降雨量和表土全盐的年际变化

Fig. 2　Annual variations of rainfall and shallow soil salinity

可以设想,在丰枯发生转换之间必然存在着分界点,此点年降雨量不会影响表土积盐或脱盐,从而形成相对稳定的盐分平衡. 引入这一概念,将理论上可能出现的这种年降雨量定义为平衡降雨量,表示为 P_0(mm). 当年降雨量与平衡降雨量的差值表示为 $\Delta P_i = P_i - P_0$;次年表土盐分与当年表土盐分的差值表示为 $\Delta S_i = S_{i+1} - S_i$,其中 i 为年份序号. 对应表1的盐分均值计算得到2002—2007各年的 ΔS_i. 将2001—2008年的近期多年平均降雨量192 mm设为 P_0,计算得出相应的 ΔP_i.

图3为 ΔP_i 和 ΔS_i 关系图. 由图可知,年降雨量和平衡降雨量的差值 ΔP_i 与次年表土盐分和当年表土盐分差值 ΔS_i 呈现很好的线性负相关关系,相关系数为0.97($P<0.001$),线性关系显著,表明所选取的平衡降雨量192 mm能够符合当地实际情况,而其他条件在年度系列中则保持相对稳定,其所带来盐分改变的程度可以忽略不计. 由此说明,在灌排条件(灌排工程措施、灌溉用水量等)保持相对稳定条件下,降雨量是决定当地表土盐分动态的主要影响因素. 根据 ΔP_i 和 ΔS_i 的相关关系式,可以作出下一年春季面上平均表土盐分的预测预报.

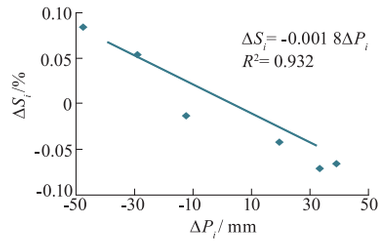


图3 ΔP_i 和 ΔS_i 关系

Fig. 3 Relationship between ΔP_i and ΔS_i

综上所述,可根据当年降雨量和当年至次年表土盐分增减预报,相应调整灌溉用水量. 表土盐分控制目标是通过灌溉用水等工程技术措施,调节土壤盐分,使达到稳定平衡或向脱盐方向发展,以利作物正常生长. 根据当地条件可以视 ΔP_i 为调节当年灌溉用水总量的依据. 在生长期灌水结束,以及年降水情况已经基本明确的情况下,可以在当年的冬灌定额中进行后期调节. 如果年降雨量小于平衡降雨量,则在冬灌定额中增加与 ΔP_i 同等的水量,也可以增加略大于 ΔP_i 的水量,使来年表土轻微脱盐,更利于作物生长;反之,则可相应减少冬灌水量.

3.4 表土盐分与地下水埋深的关系

图4为灌区内位于2,14连具有较长系列地下水位观测数据的两眼观测井1991—2004年的地下水埋深变化,以及近年来位于11,16和20连新增观测井的地下水埋深(h)动态.

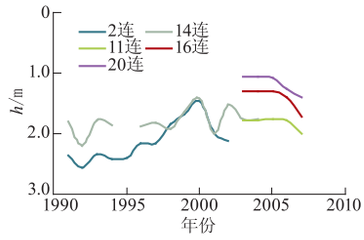


图4 地下水埋深的年际变化动态

Fig. 4 Annual variations of groundwater depth

由图4可知,1991—2000年,年际间地下水埋深虽呈现波动,但总体呈减小趋势,即地下水位呈上升趋势,地下水埋深大体保持在1.5 m以下;2000年以后,地下水埋深不再上升,基本保持稳定状态;2001年地下水位下降较多,可能与上一年较枯的年降雨量(126.9 mm)有关. 自2001年以来,团里发展节水灌溉,滴灌面积逐渐增大,2001—2006年,根据土壤普查资料中的面积所占份额估算,滴灌面积大致从4.2%增大到29.8%;而2007年,滴灌面积猛增至89.9%.

由图4还可知,从2005年开始,地下水位呈现下降趋势,2007年普遍下降,这可能也与上一年较小的雨量(144 mm)有关. 由于可供对照的资料系列较短,且缺少面上平均的地下水位动态变化,所以很难看出地下水位与表土盐分之间的相关关系,但从表土盐分增减与年降雨量和平衡降雨量差值的显著关系可以推断,在灌溉用水量变化不大的条件下,除降雨外,其他因素对面上盐分变化的干扰程度较小. 由于采用滴灌,配合明沟排水,灌溉期间的5—9月份能够将地下水埋深控制在1.5 m左右或更深一些,对表土盐分的积累作用减小. 因此,现状条件下地下水位的波动对表土盐分增减变化有一定影响.

3.5 不同滴灌使用年限表土盐分变化

在169个普查点中,土质条件有沙土、轻壤、中壤、重壤和黏土,其中灌溉方式有常规地面灌和自2001,2002,2003年等开始不同实施年限的滴灌. 对于实施滴灌年限不同的地块,包含的土质种类数量也不同. 对于轻壤、中壤、重壤和黏土类型,按不同滴灌使用年限进行分类统计,图5为这4种土质地块上不同滴灌使用年限的表土盐分变化动态. 其中自2007年以后开始实施滴灌的年限较短,均归类到常规灌溉里.

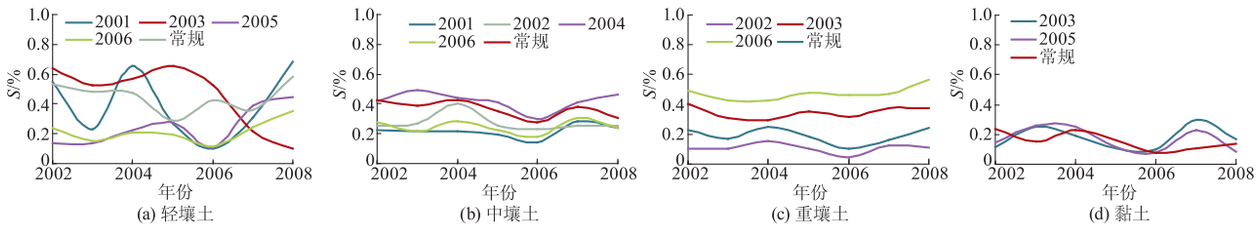


图 5　不同土壤类型不同滴灌使用年限表土盐分变化

Fig. 5　Variations of shallow soil salinity for different types of soil and service lives of drip irrigation installation

由图 5 可知,轻壤土地块不同滴灌使用年限的表土盐分波动较大,盐分本底值较高的地块波动幅度更大,表现为易于脱盐也易于积盐的特性. 不同滴灌使用年限地块变化趋势不同,中壤、重壤和黏土地块的盐分变化波动较轻壤土小,不同滴灌使用年限盐分总的变化趋势呈略增或略减趋势,增减趋势不显著. 总体上,虽然不同土质表土盐分表现有些差别,但不同滴灌使用年限之间没有明显的规律和差别,间接表明了滴灌与地面灌对表土盐分年际变化程度无显著影响,这可能是当地滴灌生长期灌溉定额与常规地面灌相比减小不多,对盐分的作用相近,因此带来的影响较小.

4　结　论

1) 新疆农七师 125 团灌区 2002—2008 年春季表土盐分监测结果表明,表土全盐均值为 0.20% ~ 0.34%,属于极轻和轻度盐渍化程度. 由空间盐分变化可知,有极轻、轻、中、重度各类盐渍土分布,表土盐分表现出中等程度的空间变异性. 2002 年以后,面上平均的表土盐分多年变化总体呈下降趋势,但脱盐率仅达 18%.

2) 不同土质表土盐分的变化特征,总的趋势呈现出轻质土盐分波动幅度大于重质土;轻质土易于积盐和脱盐,重质土盐分变化较为稳定. 虽不同土质表土盐分变化呈现出差别,但不同滴灌使用年限之间没有明显的差别和规律性.

3) 表土盐分变化与年降雨量之间关系密切,丰水年影响到来年脱盐,而枯水年则影响到来年积盐. 以近期多年平均降雨量 192 mm 为平衡点,年降雨量与平衡降雨量差值与年度盐分变化之间呈现出明显的线性负相关关系. 可根据当年降雨量和平衡降雨量差值,对当年至次年表土盐分增减作出预测预报,从而相应调整灌溉用水量.

4) 其他因素,例如起始滴灌年限、土壤质地和地下水位高低等,对土壤盐分变化虽然有一定的影响,但在现状条件下,远不及降雨的影响显著,与盐分之间的相关关系也不如降雨那样有明显的规律性. 由表土盐分总体呈下降趋势可知,在滴灌淋洗和降雨的协同作用下,表土盐分存在逐渐向更深层次转移的趋势,尽管此过程发生得比较缓慢.

参考文献(References)

[1] Boulbaba A, Marzouk L, Rabah R, et al. Variations of natural soil salinity in an arid environment using underground watertable effects on salinization of soils in irrigated perimeters in south Tunisia[J]. International Journal of Geosciences, 2012,3(5):1040 - 1047.

[2] 亓沛沛,冉圣宏,张凯. 不同灌溉方式和作物类型对西北干旱区耕地土壤盐渍化的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(4):780 - 785.
Qi Peipei, Ran Shenghong, Zhang Kai. Effects of different irrigation modes and crop types on soil salinization in Shihezi reclamation area, China [J]. Journal of Agro - Environment Science, 2012, 31(4):780 - 785. (in Chinese)

[3] Kaman H, Ozbek O. Salt and water distributions in the plant root zone under deficit irrigation[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012,10(3/4): 496 - 500.

[4] Wang Ruoshui, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area[J]. Agricultural Water Management, 2012,110:109 - 117.

[5] 孙博,解建仓,汪妮,等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011,29(4): 180 - 184.
Sun Bo, Xie Jiancang, Wang Ni, et al. Effect of straw mulching on water-salt dynamic of saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011,29(4):180 - 184. (in Chinese)

[6] 张俊华,贾科利. 宁夏红寺堡扬黄灌区次生盐渍化土

壤改良成效研究[J]. 土壤,2011,43(4):650-656.
Zhang Junhua, Jia Keli. Improvement effect of secondary salinization soil in irrigation region of Yellow River of Hongsipu, Ningxia[J]. Soils, 2011,43(4): 650-656. (in Chinese)

[7] Gharaibeh M A, Eltaif N I, Albalasmeh A A. Reclamation of highly calcareous saline sodic soil using atriplex halimus and by product gypsum[J]. International Journal of Phytoremediation, 2011,13(9):873-883.

[8] EL-Masry M A, Kamel A S M, Zohry A A. Sustainable production of cotton in saline sodic soil in northern part of Nile Delta in Egypt[J]. Egyptian Journal of Agronomy, 2010,32(1):59-72.

[9] Marlet S, Bouksila F, Bahri A. Water and salt balance at irrigation scheme scale: A comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(9):1311-1322.

[10] Florinsky I V, Eilers R G, Wiebe B H, et al. Dynamics of soil salinity in the Canadian prairies: Application of singular spectrum analysis[J]. Environmental Modelling and Software, 2009,24(10):1182-1195.

[11] 陈彦,吕新. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以新疆农七师125团为例[J]. 中国农学通报, 2005,21(7):389-391,405.
Chen Yan, Lü Xin. Spatial variability of soil nutrients based on geostatisics combined with GIS of the 7th agricultural division as example in Xinjiang [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005,21(7):389-391, 405. (in Chinese)

[12] 许志坤. 新疆盐碱土的改良[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1980.

(责任编辑 张文涛)

(上接第622页)

[9] Kool J B, Parker J C, Van Genuchten M T. Parameter estimation for unsaturated flow and transport model—A review [J]. Journal of Hydrology, 1987, 91(3/4): 255-293.

[10] 刘春平, 夏卫生, 邵明安,等. 多孔介质中溶质运移参数拟线性化估计方法[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1445-1449.
Liu Chunping, Xia Weisheng, Shao Ming'an. Quasi-linear method of parameter estimation for solute transport in porous [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1445-1449. (in Chinese)

[11] 郑纪勇, 邵明安. 应用边界层方法确定溶质迁移参数的实验研究[J]. 水利学报, 2002, 33(1): 92-96.
Zheng Jiyong, Shao Ming'an. Experimental study on the application of boundary layer theory method to the estimation of soil solute transport parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(1): 92-96. (in Chinese)

[12] Lindstrom F T, Haque R, Freed V H, et al. Theory on the movement of some herbicides in soil: Linear diffusion and convection of chemicals in soil [J]. Environmental Science and Technology, 1967, 1(7): 561-565.

[13] Lee J, Horton R, Jaynes D B. A time domain reflectometry method to measure immobile water content and mass exchange coefficient[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 1911-1917.

[14] Staub M J, Laurenta J P, Gourc J P, et al. Applicability of time domain reflectometry water content measurements in municipal solid waste soil[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(1): 160-171.

(责任编辑 谈国鹏)