内蒙古腰坝绿洲的土壤盐渍化特征

赛佳美[1,2], 卢玉东[1,2], 王正川[1,2], 贺美娜[1,2]

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘　要: [目的] 研究内蒙古阿拉善左旗腰坝绿洲土壤盐渍化特征及土壤盐分离子分布规律,为研究区农业生产发展及生态环境保护计策提出合理依据。[方法] 通过在野外考察、GPS 定点、样品采集和处理并借助 Excel 和 SPSS 软件,运用统计学方法研究了该区土壤盐离子含量、总碱度与土壤离子含量之间的关系、土壤含盐量以及盐离子间的相关性。[结果] 灌区土壤 pH 值平均值为 8.13,为碱性土,土壤盐分含量较高,其中 0—10 cm 土壤盐离子含量最高,平均值达到 4.49%。阳离子主要是 Ca^{2+} 和 $K^+ + Na^+$,阴离子主要是 $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$,$CO_3^{2-}$ 含量微小。0—10 cm 土层和 10—60 cm 土层中 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 均有极显著正相关,相关性均大于 0.95,因子分析中 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+},Cl^- 和 $K^+ + Na^+$ 发生"聚类"现象。[结论] 灌区盐渍化土主要为硫酸盐渍土,其次为氯化盐渍土,该盐渍土危害植被生长。

关键词: 土壤盐渍化; 土壤特征; 阿拉善腰坝绿洲

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2017)05-0152-05　　**中图分类号**: S156.4

文献参数: 赛佳美, 卢玉东, 王正川, 等. 内蒙古腰坝绿洲的土壤盐渍化特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 152-156. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.026; Sai Jiamei, Lu Yudong, Wang Zhengchuan, et al. Characteristics of soil salinization in Yaoba Oasis of Inner Mongolia Autonomous region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 152-156. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.026

Characteristics of Soil Salinization in Yaoba Oasis of Inner Mongolia Autonomous Region

SAI Jiamei[1,2], LU Yudong[1,2], WANG Zhengchuan[1,2], HE Meina[1,2]

(1. *School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Key Laboratory of Surface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] To study the characteristics of soil salinization and the distribution of soil salt ions in Yaoba Oasis of Alax Left Banner in Inner Mongolia Autonomous Region, and to provide a certain basis for the development of agricultural production and ecological environment protection. [Methods] We studied the distribution of soil salinization, the relationship between ion content and values of total alkalinity, salt ion content, as well as the relationship between salt amount and ion content by the means of sampling, GPS positioning and statistical methods. The testing results were analyzed with Excel software and SPSS software. [Results] The average pH value of the irrigation area soil is 8.13, it is alkaline soil. Land of Yaoba Oasis is high in salt content. The salt content of soil is mostly concentrate in 0—10 cm depth, which can reach 4.49%. Cations are mainly Ca^{2+} and $K^+ + Na^+$, whereas anions are mainly SO_4^{2-}, Cl^-, HCO_3^- in the study area, having a rank as: $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$. Content of CO_3^{2-} accounts for few proportion. There are significant positive correlations between SO_4^{2-} and Ca^{2+} both in 0—10 cm soil layer and 10—60 cm soil layer, and their correlation coefficients are more than 0.95. Factor analysis showed that there are significant ties between SO_4^{2-} and Ca^{2+}, and between anion Cl^- and cations of $K^+ + Na^+$. [Conclusion] The salinized soils in the irrigation area are mainly sulphate and chloride saline soils, which are harmful to the growth of vegetation.

Keywords: **soil salinization; soil characteristics; Yaoba Oasis of Alax**

收稿日期: 2017-03-06　　**修回日期**: 2017-04-21

资助项目: 国家自然科学基金项目"黄河上游德恒隆—锁子巨型滑坡地震触发机理及破坏模式研究"(41302253); 阿拉善 SEE 生态协会基金资助项目(220029150182)

第一作者: 赛佳美(1991—),女(汉族),山东省威海市人,硕士研究生,研究方向为地下水化学。E-mail: 18291811632@163.com。

通讯作者: 卢玉东(1969—),男(汉族),河北省唐山市人,教授,博士生导师,主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 18631061634@163.com。

土壤盐渍化问题是干旱区可持续发展和改善环境质量的战略问题之一。据统计,中国的盐渍化面积约 3.60×10^7 hm^2,其中占全国可利用土地面积的 4.88%[1]。而干旱区面积占全国总面积的 1/3,盐碱土广泛分布[2]。土壤的盐渍化问题和灌溉引起的土壤次生盐渍化问题是干旱区绿洲农业发展的重要障碍[3]。绿洲地区的农业生产是干旱区人们生存和经济发展的命脉,内蒙古腰坝绿洲区是干旱区重要的农垦区,每年以 60%以上的农业产量供给整个盟区及附近地区,其盐渍化土地面积已达 6 461 hm^2,占总面积近 80%。加之干旱的气候条件和不合理灌溉方式使该区土壤盐渍化更严重,现已成为制约绿洲农业开发和可持续发展的重大限制条件[4]。

薛风海[5]论述了腰坝绿洲区的盐渍化现状及其形成的水文、气候、地质背景,说明该区土壤盐渍化现象始终存在,研究发现灌溉因素是该区土壤盐渍化形成的重要因素。江凌等[6]分析腰坝绿洲区土壤盐渍化的形成原因主要是受残余积盐和灌溉的双重影响,并对绿洲区土壤盐渍化现象提出规范灌溉水质要求、扩大防护林面积、增施有机肥等治理措施。刘贯群[7]通过地下水数值模拟概化出该区水文地质概念模型,指出灌区下游地下水位超过临界埋深,是造成土壤次生盐渍化的重要因素。有的专家还对土壤盐渍化主要参数(电导率、含水量、含盐量、pH 值)的空间异质性进行了分析[8]。

盐渍土的发生受到区域性因素的制影响和制约,其盐分组成及离子比例会呈现出区域性的特点,积盐、脱盐过程都存在差异[9],土壤中的可溶性离子的不同组合方式对农作物和植物的影响也是不尽相同的。由此,切实查明土壤盐渍化分布特征、盐渍土成分组成特点,对于科学合理的利用和开发盐渍土具有重大的经济和社会价值。本文拟以内蒙古腰坝绿洲为研究对象,运用统计学方法对土壤中的可溶性盐离子做出分析,以期得出研究区土壤盐渍化土壤因子特征,为该区今后的生态发展、农业经济的可持续发展和盐渍化土壤的治理和规划提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

内蒙古阿拉善左旗腰坝绿洲是西部干旱地区最大的沙漠绿洲,腰坝绿洲总面积约 81 km^2,位于贺兰山西侧洪积倾斜平原的边缘,西邻腾格里大沙漠,绿洲西低、东北南高,为一个小型的簸箕状闭流的盆地。阿盟地区位于典型的温带大陆性气候区,该气候的特点是全年多风少雨,光照强烈,蒸发量远大于降雨量,降雨多集中于 7,8,9 月,全年平均降雨量约为 198 mm,年蒸发量从东向西由 1 400 mm 增至 2 000 mm 以上[7]。白天日照强烈,全天平均日照时长 7.7 h,而夏季全天日照时数最长可达 13.6 h。区内土壤类型主要有 3 类:棕钙土、漠境盐土和风沙土。腰坝灌区地下水主要来源于贺兰山降水入渗侧向补给,灌区地下水埋深过大(平均为 20 m),地下水矿化度较高,一般在 0.4～7 g/L,大部分低于 3 g/L。

1.2　研究方法

本次样品采样以遥感影像数据为参考,运用 GPS 定位,使采样点尽可能遍及绿洲范围内的主要土地利用类型,以便于更全面、更直观的进行统计分析,样品采集是对深度为 0—10 和 0—60 cm 土壤进行采样,采样时间为 2015 年 8—9 月和 2016 年 8 月,选取采样点共 89 个。考虑到采样点周围土壤性质相对成因一致,环境因子类似,异质性较小,每一采样点周围辐射约 10 m 处选取 2 个点,呈三角形形状采样,混合土样(即每个采样点都是 3 个点的混合),用四分法取约 500 g 的土样用自封袋装好带回实验室[10]。将土样放置在通风良好的地方进行风干,风干后将土磨碎,过 1 mm 细筛,备用。

将已经磨碎好的土样进行溶液配制,称取土样,按 5∶1 的水土比配制浸提液,用于测定土壤含盐量、离子组成、pH 值和电导率。用 PH 电极(PH211 Microprocessor PH Meter)对 pH 值测定。土壤离子及全盐量的测定参考《土壤农业化学分析方法》[11]。

2　结果与分析

2.1　盐离子含量分析

根据土壤盐离子的分析结果(表 1),土壤中的主要离子为 Ca^{2+},$K^+ + Na^+$,Mg^{2+},SO_4^{2-},Cl^-,HCO_3^- 和 CO_3^{2-}。阳离子主要是 Ca^{2+} 和 $K^+ + Na^+$,其含量分别占全盐量的 10%～21%和 9%～32%;阴离子主要是 SO_4^{2-},Cl^-,其含量分别占全盐量的 20%～73%和 17%～61%,由此初步判断盐渍化主要危害成分是硫酸盐和氯化盐。由表 1 结果可以看出 pH 平均值为 8.13,依据土壤酸碱程度分级,为碱性土。变异系数能反映随机变量的离散程度,一般认为 $C_v \geqslant 10\%$ 为弱变异性,$10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性,$C_v \leqslant 100\%$ 为强变异性[12]。在深度为 0—10 和 10—60 cm 的土层中,pH 值的变异性弱。而不同土层的土壤全盐量、SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 的变异系数较大,说明土壤盐渍化的空间变异性较大,受地形地貌、水文气象条件和人类活动等因素的影响较大[13]。根据盐分上下运移规律,氯化物最为活跃,其次为硫酸盐,碳酸盐较稳定,但实际中灌区盐渍土以硫酸盐为主,氯盐次

之,是因为灌区成土母质中富含硫酸盐(附近含有芒硝矿),使地下水中硫酸根离子含量高远于氯离子,故氯离子表聚强烈,但以硫酸盐为主。在干旱条件下,强烈的蒸发使 HCO_3^- 变为 CO_2 挥发,留下 CO_3^{2-} 使表土中的碳酸盐含量增高。灌区土壤中的可溶盐聚盐和脱盐过程并存,表土中无论是土壤盐离子组成还是全盐量,0—10 cm 的土层中的值普遍比 10—60 cm 土层的值大,可初步推断盐分离子主要发生聚盐过程,脱盐过程不明显,这与灌区的气候条件如降雨少蒸发强有着密切的关系。

表 1 土壤盐分统计特征参数

深度/cm	参 数	pH 值	全盐量/%	离子组成(meq/100 g 土)						
				Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	CO_3^{2-}
0—10	平均值	8.03	0.74	166.45	16.61	69.10	236.35	56.95	198.63	1.09
	最大值	8.62	3.55	856.24	60.78	325.65	1 245.78	76.28	1 030.47	4.20
	最小值	7.72	0.10	2.49	5.17	8.52	7.20	30.51	12.41	0.00
	中 值	8.02	0.18	25.30	7.15	19.29	37.83	62.55	15.07	0.45
	标准偏差 S_D	0.38	1.38	338.61	21.85	125.89	495.31	19.65	409.20	1.56
	变异系数 C_v/%	4.68	184.88	203.43	131.53	182.19	209.57	34.50	206.1	142.72
10—60	平均值	8.23	0.35	68.96	12.37	31.75	122.89	46.25	70.21	0.50
	最大值	8.61	0.88	189.69	20.73	88.03	378.24	74.62	172.14	3.00
	最小值	8.03	0.11	12.01	2.43	8.62	7.44	29.29	7.76	0.00
	中 值	8.10	0.29	50.86	11.02	24.47	79.48	43.46	68.03	0.00
	标准偏差 S_D	0.24	0.29	66.89	6.68	29.34	143.64	16.43	59.67	1.22
	变异系数 C_v/%	2.97	82.18	96.99	54.00	92.42	116.89	35.53	84.98	244.94

2.2 土壤总碱度与离子含量间的关系

土壤总碱度的指示离子是 CO_3^{2-} 和 HCO_3^-,即 $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 的总含量代表土壤总碱度。经分析得出重碳酸根离子与土壤总碱度间有显著相关关系,但样品分析结果中碳酸根离子和重碳酸根离子普遍检出,而碳酸根离子含量甚少,故对总碱度的相关性影响微妙,造成该结果的主要原因可能是无论是化学稳定性还是热稳定性,重碳酸根离子均比碳酸根离子的稳定性强。

由于地下水埋深大,灌溉初期碳酸根在水溶液中易与水中的氢离子结合形成重碳酸根离子和氢氧根离子,随着蒸发作用的进行,碳酸根离子的不稳定性造成土壤中的重碳酸根离子的含量显著高于碳酸根离子,故土壤中的重碳酸根是土壤总碱度的主要影响离子,碳酸根离子与土壤总碱度间显示出显著的相关性。

2.3 盐离子相关性分析

对表层土壤基盐中的离子进行相关性分析,不仅可以揭示土壤中离子的存在形态以及与全盐量之间的关系,而且可在一定程度上反映出盐分在土壤中的运移趋势[14]。

采用 Pearson 相关分析法对土壤不同分层中的离子进行相关性分析(表 2),0—10 cm 土层中,Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 和全盐量有极显著正相关,全盐量与 SO_4^{2-} 为极显著正相关,$K^+ + Na^+$ 与 SO_4^{2-} 和全盐量有显著正相关。10—60 cm 土层中 $K^+ + Na^+$ 与 Ca^{2+} 和全盐量有极显著正相关,与 Cl^- 和 SO_4^{2-} 有显著正相关;Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 和全盐量有极显著正相关,与 Cl^- 有显著正相关;全盐量与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为极显著正相关,SO_4^{2-} 与 Cl^-,HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 均有正相关,Mg^{2+} 和 Cl^- 有显著正相关。尤其在不论土层深度,SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 均为极显著正相关($p>0.95$),说明研究区表层土壤聚盐强烈,以硫酸盐为主,盐分以向上运移为主。

将研究区的 Ca^{2+},Mg^{2+},$K^+ + Na^+$,SO_4^{2-},HCO_3^-,Cl^-,含盐量和 pH 值作为变量进行因子分析,因子分析是用较少的变量代替整体变量分析的一种数学统计方法,将其中具有错综复杂关系的因子进行降维,以方差累计贡献率大于 80%作为依据来确定因子个数,在信息损失最小的情况下选取主导因子,便于对变量的分布和特征进行定性的描述,以对土壤盐渍化做出正确的评价。从 0—10 cm 土壤因子得分矩阵(表 3)可看出 0—10 cm 土壤第 1 主成分与 Ca^{2+},SO_4^{2-} 和含盐量呈正相关,第 2 主成分与 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 呈正相关,第 3 主成分与 CO_3^{2-} 和 PH 呈正相关,第 4 主成分与 Mg^{2+},HCO_3^- 呈正相关,从 10—60 cm 土壤因子得分矩阵(表 4)可看出 10—60 cm 土壤第 1 主成分与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 呈正相关,第 2 主成分与 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 呈正相关,第 3 主成分与 pH 值呈正相关,第 4 主成分与 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 呈正相关。

随着土壤中碱度和含盐量的增加,土壤中酶的活性降低,使土壤肥力急剧下降[15]。高浓度的 Cl^-,HCO_3^- 和 $K^+ + Na^+$ 离子几乎会抑制植物根部细胞内所有酶的活性,严重影响植被生长,甚至毒害植物致死。由此便于反映土壤积盐离子的毒害作用和土壤结构,因子得分矩阵在第 1 主成分一致的基础上,第 2 主成分越大,说明土层中的毒害离子浓度越高,土质越差,越不宜植被生长。将 9 维空间的样本点降维映射,绘制第 1 主成分和第 2 主成分二维辨别关系图(图 1),发现部分离子和变量发生了明显的"聚类"现象:在 0—10 cm 土层中,SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 聚为一簇,Mg^{2+},$K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 聚为一簇;在 10—60 cm 土层中,$K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 聚为一簇,SO_4^{2-},Ca^{2+},Mg^{2+} 和含盐量聚为一簇。

表 2　土壤盐分离子相关分析矩阵

深度/cm	变量	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	全盐量	pH 值
	$K^+ + Na^+$	1.00								
	Ca^{2+}	0.823**	1.00							
	Mg^{2+}	0.589**	0.683**	1.00						
	Cl^-	0.722**	0.592*	0.798**	1.00					
0—10	SO_4^{2-}	0.900**	0.977**	0.674**	0.634**	1.00				
	HCO_3^-	−0.273*	−0.182	0.061	−0.303*	−0.295*	1.00			
	CO_3^{2-}	−0.101	−0.207	−0.192	−0.080	−0.148	−0.317*	1.00		
	全盐量	0.915**	0.968**	0.768**	0.710**	0.978**	−0.146	−0.200	1.00	
	pH 值	−0.334*	−0.53**	−0.606**	−0.453**	−0.443**	−0.309*	0.689**	−0.528**	1.00
	$K^+ + Na^+$	1.00								
	Ca^{2+}	0.974**	1.00							
	Mg^{2+}	0.632	0.605	1.00						
	Cl^-	0.923**	0.945**	0.949	1.00					
10—60	SO_4^{2-}	0.900**	0.974**	0.630	0.920**	1.00				
	HCO_3^-	−0.510	−0.504	−0.214	−0.576	−0.511	1.00			
	CO_3^{2-}	−0.401	−0.392	−0.306	−0.56	−0.398	−0.909*	1.00		
	全盐量	0.994**	0.983**	0.689	0.952**	0.993**	−0.481	−0.397	1.00	
	pH 值	−0.547	−0.539	−0.666	−0.748	−0.545	0.828*	0.895*	−0.569	1.00

注:** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 3　0—10 cm 土层土壤因子得分

变量	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
Ca^{2+}	0.378	−0.253	0.005	0.092
Mg^{2+}	−0.126	−0.117	0.149	0.337
$K^+ + Na^+$	0.292	0.616	0.064	−0.033
SO_4^{2-}	0.366	−0.235	0.020	−0.005
Cl^-	−0.280	0.718	0.007	−0.263
HCO_3^-	0.106	−0.009	0.187	0.963
CO_3^{2-}	0.062	0.222	0.778	0.279
含盐量	0.308	−0.090	0.061	0.126
pH 值	0.118	−0.206	0.435	−0.010

表 4　10—60 cm 土层土壤因子得分

变量	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
Ca^{2+}	0.326	0.056	−0.28	0.044
Mg^{2+}	−0.218	0.141	0.119	−0.178
$K^+ + Na^+$	0.266	0.058	−0.088	0.856
SO_4^{2-}	0.363	0.058	−0.078	−0.047
Cl^-	0.159	−0.005	0.109	0.756
HCO_3^-	0.03	0.431	0.175	0.048
CO_3^{2-}	0.078	0.443	0.214	−0.208
含盐量	0.256	0.076	−0.059	0.055
pH 值	0.217	0.298	0.422	0.104

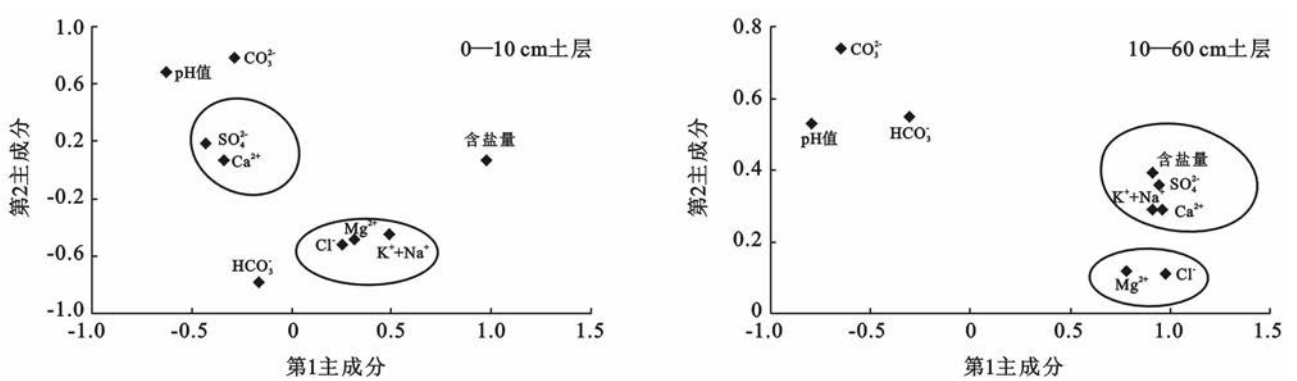


图 1　第 1 主成分与第 2 主成分二维辨别关系

3 结 论

(1) 腰坝绿洲土壤盐渍化的空间变异性较大，0—10 cm 的土层中的全盐量和盐离子含量普遍较 10—60 cm 土层中的含量高，土层中的盐分离子主要发生聚盐过程，脱盐过程不明显。腰坝绿洲全区 pH 平均值大于 8，试验中监测出的 CO_3^{2-} 含量微妙，监测出的 HCO_3^- 与总碱度呈显著正相关，证明该区盐渍土壤正发生着盐化和碱化的双重特性。

(2) 离子相关性分析结果中，0—10 cm 土层中 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 均有极显著正相关($p=0.977$)。而 10—60 cm 土层中，SO_4^{2-}，Cl^-，$K^+ + Na^+$，Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均有显著的正相关关系($p>0.90$)，说明了 SO_4^{2-}，Ca^{2+}，Cl^-，$K^+ + Na^+$ 是土壤中主要的影响因子，土壤的盐渍土类型是以硫酸型盐渍土和氯化型盐渍土为主，该类盐渍土严重破坏了土壤的理化性质，土壤性质向继续恶化的方向发展，对作物有严重的毒害作用。经调查灌区主要种植玉米，耐盐性能差，无论对作物产量而言还是土地改良都是不利的。

[参 考 文 献]

[1] 王佳丽，黄贤金，钟太洋，等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报，2011，66(5)：673-684.

[2] 田长彦，周宏飞，刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理，2000，23(2)：177-181.

[3] 任加国，郑西来，许模，等. 新疆叶尔羌河流域土壤盐渍化特征研究[J]. 土壤，2005，37(6)：635-639.

[4] 李素英，李晓兵，符娜，等. 内蒙古典型草原区土壤硬度与土壤水分的空间变化分析：以锡林浩特为例[J]. 干旱区地理，2007，30(2)：196-202.

[5] 薛风海. 我区西部牧区井灌饲草料基地的土壤盐碱化问题研究：阿盟腰坝灌区调查[J]. 内蒙古水利，1986(4)：20-24.

[6] 姜凌，李佩成，胡安焱，等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理，2009，32(2)：234-239.

[7] 刘贯群. 内蒙孪井灌区地下水数值模拟及土壤盐渍化预报[D]. 山东 青岛：青岛海洋大学，2002.

[8] 马成霞，丁建丽，杨爱霞，等. 绿洲区域土壤盐渍化主要参数的空间异质性分析[J]. 干旱区资源与环境，2015，29(2)：144-150.

[9] 毛任钊，田魁祥，松本聪，等. 盐渍土盐分指标及其与化学组成的关系[J]. 土壤，1997，29(6)：326-330.

[10] 卢磊，乔木，周生斌，等. 新疆渭干河流域土壤盐渍化及其驱动力分析[J]. 农业现代化研究，2011，32(3)：357-361.

[11] 鲁如坤，陈怀满，周建民. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000：85-96.

[12] 姚荣江，杨劲松，刘广明，等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报，2006，22(6)：61-66.

[13] 贾艳红，赵传燕，南忠仁. 黑河下游地下水波动带土壤盐分空间变异特征分析[J]. 干旱区地理，2008，31(3)：379-388.

[14] 石迎春，辛民高，郭娇，等. 西北地区黑河中游盐渍化地区土壤盐分特征[J]. 现代地质，2009，23(1)：28-37.

[15] 李凤霞，王学琴，郭永忠，等. 银川平原不同类型盐渍化土壤酶活性及其与土壤养分间相关分析研究[J]. 干旱区资源与环境，2012，(7)：121-126.

(上接第 151 页)

[3] Duan Runbin, Fedler C B, Borrelli J. Field evaluation of infiltration models in lawn soil[J]. Irrigation Science, 2011, 29(5): 379-389.

[4] 宋小帅，康峰峰，韩海荣，等. 辽河源典型森林类型的土壤水文效应[J]. 水土保持通报，2015，35(2)：101-105.

[5] 肖庆礼，黄明斌，邵明安，等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. 农业工程学报，2014，30(2)：124-131.

[6] 武敏，冯绍元，孙春燕，等. 北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J]. 中国农业大学学报，2009，14(4)：98-102.

[7] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth [J]. Soil Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.

[8] 姜凌，李佩成，胡安炎，等. 内蒙古阿拉善腰坝绿洲地下水水化学特征[J]. 干旱区资源与环境，2009，23(11)：105-110.

[9] 朱良军，张光辉，任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报，2012，32(6)：163-168.

[10] 周鑫洋，王仰仁，刘群昌. 四个入渗公式对农田潮土的适应性研究[J]. 灌溉排水学报，2015，34(8)：96-100.

[11] 徐海芳，刘恩民，郑丽萍. 农田土壤表层入渗指数的空间相关性研究[J]. 中国农村水利水电，2004(11)：11-13.

[12] 聂卫波，武世亮，马孝义，等. 农田土壤入渗特性研究[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(4)：31-37.

[13] 赵文举，郁文，范严伟，等. 滴灌条件下容重对压砂土壤水分入渗规律的影响[J]. 水土保持通报，2016，36(1)：169-173.