

典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究

刘祖香¹, 陈效民¹, 靖彦¹, 黄欠如², 李秋霞¹

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 江西红壤研究所, 江西 进贤 331717)

摘要: 为了更系统地了解旱地红壤供水与贮水能力、有效水含量及其变化范围, 按自然发生层采集旱地红壤原状土样, 对其进行了水力学特性和影响因素研究。结果表明, 旱地红壤原状土饱和导水率变化范围为 $1.44 \times 10^{-3} \sim 3.45 \times 10^{-3}$ cm/s, 并呈现自上而下减小的趋势。从旱地红壤水分特征曲线得出剖面各层土壤的饱和含水量、田间持水量、萎蔫含水量和有效水含量, 其中有效水含量变化区间为 $0.083 \sim 0.124$ cm³/cm³, 耕作层最高。在旱地红壤水力学特性的影响因素研究中, 容重、质地、有机质含量和结构系数均与水力学特性呈一定的相关性, 其中容重和孔隙度为旱地红壤水力学特性的主要影响因素。

关键词: 旱地红壤; 水力学特性; 饱和导水率; 水分特征曲线; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0021-05

中图分类号: S152.7

Hydraulic Characteristics and Its Impact Factors in Typical Red Soil Region

LIU Zu-xiang¹, CHEN Xiao-min¹, JING Yan¹, HUANG Qian-ru², LI Qiu-xia¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 2. Red Soil Institute of Jiangxi Province, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract: To understand water storage capacity, varying range of available water in typical red soil more systematically, and undisturbed red soil samples in soil profiles were collected. The soil hydraulic characteristics and impact factors also were studied. The results showed that the range of undisturbed soil saturated hydraulic conductivity was between 1.44×10^{-3} and 3.45×10^{-3} cm/s. Its value decreased from top to bottom. The saturated water content, field capacity, wilting water and available water were figured out from the soil moisture characteristic curves. Available water content varied from 0.083 to 0.124 cm³/cm³, and surface soil layer was the largest one. There were some correlations between hydraulic characteristics and its impact factors, such as bulk density, soil texture, organic matter content and soil structure coefficient. The soil bulk density and porosity were the main impact factors.

Keywords: red soil; hydraulic characteristics; saturated hydraulic conductivity; moisture characteristic curves; impact factors

土壤具有容纳、保持和传导水分的能力, 土壤中的水分含量和分布不仅影响土壤的物理性质, 还制约着土壤中养分的淋溶、转移和微生物活动, 同时也是土壤肥力的重要指标之一, 这些决定了土壤的水力学性质^[1-2]。通常水力学参数包括土壤含水量, 饱和导水率, 非饱和导水率和水分特征曲线等^[3]。土壤饱和导水率是土壤重要的物理参数之一^[4], 是计算土壤剖面中水通量和设计灌溉、排水系统工程的一个重要参数, 在研究土壤水分平衡及水分管理、土壤改良和水

土保持中具有重要的意义。土壤水分特征曲线是土壤水能量状态和数量之间的关系, 反映了土壤持水的基本特性^[2], 是确定土壤的水分含量与基质势之间定量关系的重要参数, 在研究土壤水分运动和溶质运移中有着非常重要的作用。由第四纪红色黏土发育而来的江西旱地红壤, 其质地黏重, 有机质含量较低, 硬度较大, 黏粒表面吸附水分和团聚体内所吸持的无效水分占土壤含水量的比重较大, 导致其有效水含量较低, 保水、保肥性差^[5]。因此, 研究旱地红壤的水力学

收稿日期: 2012-04-10

修回日期: 2012-05-21

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目“典型地区农田地力定向培育理论与技术对策”子课题“典型红壤区农田地力定向培育与提升技术研究”(2011CB100506)

作者简介: 刘祖香(1985—), 女(汉族), 四川省绵阳市三台县人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土资源利用与管理。E-mail: liuzuxiang06@163.com。

通信作者: 陈效民(1957—), 男(汉族) 江苏省南京市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土资源利用与管理。E-mail: xmchen@njau.edu.cn。

特性,掌握其传导和保持水分的能力以及有效水含量,对于解决红壤地区旱地土壤板结、干旱等问题具有重要意义,同时也可作为旱地红壤地力的提升提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

选择江西省红壤研究所的红壤旱地为试验地,其地理位置为 $116^{\circ}20'24''N, 28^{\circ}15'30''E$,是典型的低山丘陵红壤地区,其气候条件优越,年均降雨量 1 549 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm;干湿季节明显,3—6 月为雨季,降雨量占全年雨量 61~69%;7—9 月为旱季,蒸发量占全年蒸发量的 40~50%。旱地红壤由第四纪红色黏土发育而来,酸度较高,质地较黏,硬

度较高,地利用率低,产出率低。

1.2 试验方法

1.2.1 供试土壤基本理化性质的测定 土壤采自江西省红壤研究所的旱地红壤,2011 年 8 月按 0—15 cm,15—30 cm,30—46 cm 和 46—100 cm 分层采集土壤剖面样品。土壤容重的测定采用环刀法;土壤颗粒组成和土壤结构系数的测定采用吸管法;土壤总孔隙度采用 $(1 - \text{容重} \div \text{比重}) \times 100$ 计算;土壤水稳性团粒测定采用约得尔法(Yoder);土壤含水量的测定采用常规烘干法;土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法;土壤全氮的测定采用 H_2SO_4 —混合催化剂消煮—蒸馏滴定法;土壤 CEC 测定采用乙酸铵交换法;土壤 pH 值的测定采用酸度计法^[6]。测定结果详见表 1。

表 1 研究区旱地红壤基本理化性质

土层深度/cm	pH 值	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度/%	结构系数/%	有机质含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	CEC/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	机械组成/($g \cdot kg^{-1}$)		
								黏粒	粉砂粒	砂粒
0—15	4.54	1.23	53.58	94.16	16.29	1.06	15.95	316.00	391.20	292.80
15—30	5.00	1.49	43.60	82.14	13.43	0.90	17.47	374.40	374.40	251.20
30—46	5.46	1.58	40.27	80.18	10.34	0.62	24.08	499.20	249.60	251.20
46—100	5.55	1.45	45.28	86.13	7.54	0.45	18.97	499.20	239.60	261.20

1.2.2 土壤水分参数的测定 土壤水分特征曲线的测定采用压力膜法。分层(0—15 cm,15—30 cm,30—46 cm,46—100 cm)用容重圈(直径为 5 cm,高为 3 cm)直接在旱地采集原状土样,每个土层 3 个重复,具体测定方法参见文献^[7-8]。土壤饱和导水率的测定采用渗透率仪—常水头法,按红壤旱地发生层用环刀(容积 $120.8 cm^3$)在田间采集原状土样,每个土样 3 个重复。具体参见文献^[4]。

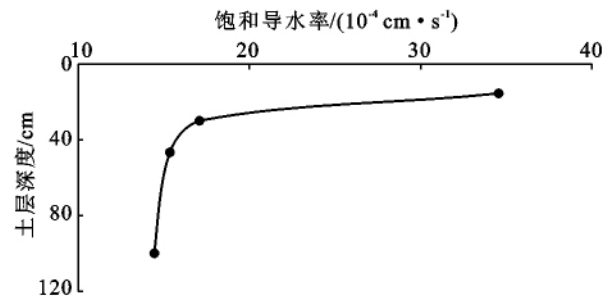


图 1 研究区旱地红壤饱和导水率剖面分布

2 结果与分析

2.1 旱地红壤土壤水力学特性

2.1.1 饱和导水率 原状土饱和导水率能反映田间的实际情况,因其保持了原来土壤的基本性状,在研究土壤水分平衡及水分管理、土壤改良和水土保持时具有极其重要的意义。

由图 1 可知,旱地红壤原状土饱和导水率的变化范围在 $1.44 \times 10^{-3} \sim 3.45 \times 10^{-3} cm/s$,并呈现自上而下减小的趋势,耕作层饱和导水率远大于其它各层,这是因为耕作导致该层土壤大孔隙较多,土壤疏松,土壤水分的通透性增强;耕作层以下的土壤农耕难以到达,且黏粒含量相对富集^[4],因此土壤较为板结,饱和导水率较低。

2.1.2 水分特征曲线 土壤水分特征曲线表示土壤水的能量状态和数量之间的关系,是土壤质地、结构和孔隙等物理性综合作用的结果,反映了土壤持水的基本特性,体现了土壤质地结构的差异,不同质地的土壤,其水分特征曲线是不同的^[9]。土壤的基质吸力由两部分组成,即毛管作用引起的吸力和土壤颗粒表面吸附作用引起的吸力。因此,随土壤含水量的变化,基质吸力发生变化^[10],其在 0 吸力下的含水量为饱和含水量;在 $3.0 \times 10^4 Pa$ 吸力时的含水量为田间持水量;在 $1.5 \times 10^6 Pa$ 吸力时的含水量为萎蔫点含水量;一般认为有效水含量即是田间持水量与萎蔫点含水量之差^[7]。

由表 2 可知,旱地红壤的有效水变化范围为

0.083~0.124 cm³/cm³ 之间,其中耕作层有效水含量最高,分别比犁底层、网纹层高出 0.027 和 0.414 cm³/cm³,其变化趋势与陈效民等^[2]的研究结果类似。从图 2 可以看出,在基质吸力为 0~3.0×10⁴ Pa 时,旱地红壤耕作层土壤受到吸力后,含水量急剧下降,由开始的最高变为最低,这种趋势持续到 1.5×10⁶ Pa,这是因为耕作层土壤容重较小且总孔隙度较大,大孔隙较多,在饱和的情况下可以维持较多的水分,当吸力增加时,由于该土层土壤黏粒含量少,且在耕作管理下结构孔隙已有所发育,持水性不强,水分较易释放,因此含水量降至最低,而黏粒含量较高的底层变化趋势却较为平缓^[11]。网纹层的土壤因其容重最大,没有大孔隙,黏粒含量较高,所保持的水分较少,因此饱和含水量最低,但当受到的吸力逐渐增大时,由于其黏粒较多,持水性强,保持在细小土粒间的水分不易被吸出,因此萎蔫点含水量较高^[12]。

表 2 研究区旱地红壤土壤水分状况 cm³/cm³

土层/ cm	饱和 含水量	田间 持水量	萎蔫点 含水量	有效 水含量
0—15	0.564	0.275	0.151	0.124
15—30	0.477	0.324	0.227	0.097
30—46	0.446	0.290	0.207	0.083
46—100	0.455	0.324	0.210	0.114

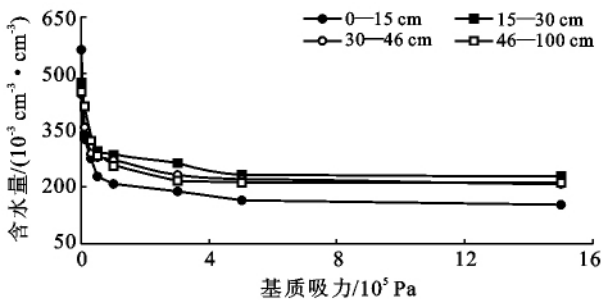


图 2 研究区旱地红壤土壤水分特征曲线

2.2 旱地红壤水力学特性的影响因素

2.2.1 容重对水力学特性的影响 容重反映了土壤孔隙的大小、数量和剖面中的分布状况,以及土体的结构性。土壤容重的不同将改变土壤的孔隙状况,因而导致土壤的透水性能和持水性能的变化,因此容重与饱和导水率和水分特征曲线关系密切。由图 3 可知,旱地红壤饱和导水率、饱和含水量和有效水含量与土壤容重呈极显著的负相关关系。本研究中容重与饱和导水率与白冰^[4]的研究结果一致,表明土壤容重越大,土壤的孔隙度越小,团粒结构丧失,土壤变得紧实,毛管作用不强,导水性能弱,不利于土壤通

气透水以及土壤水分的保持,因此土壤导水性能和持水性能也降低^[4]。

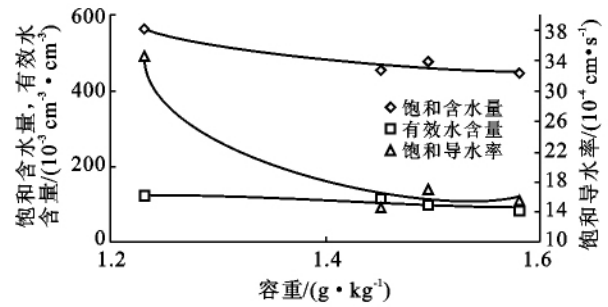


图 3 研究区旱地红壤容重与水力学特性的关系

2.2.2 有机质对水力学特性的影响 土壤有机质含量不仅是土壤中养分的主要来源之一,而且能改善土壤结构,提高土壤孔隙度,增强土壤的通透性,从而提高土壤的导水性能和保持水分的能力。由图 4 可知,旱地红壤土壤饱和导水率和饱和含水量与土壤有机质呈正相关关系,其中有机质和导水率的关系研究结果与邓建才等^[13]的结论一致,表明土壤有机质对土壤的导水性能和持水性能具有重要的影响,其含量越高,土壤中团粒结构越易形成,土壤结构越好,土壤通气状况和透水性能越强^[6]。对于同一土壤水吸力,有机质含量越高,土壤团聚体越发达,土壤含水量越大^[14],因此土壤饱和导水率和饱和含水量也越大。

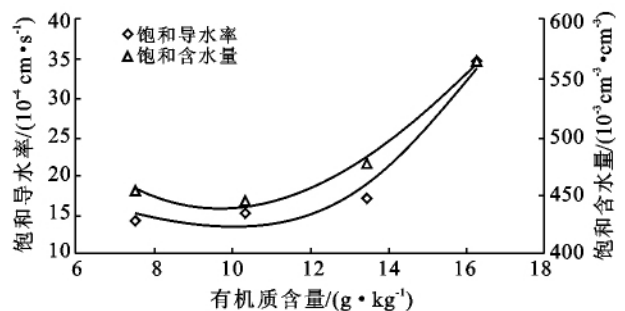


图 4 研究区旱地红壤有机质含量与水力学特性的关系

2.2.3 黏粒含量对水力学特性的影响 土壤质地对饱和导水率和水分特征曲线的影响很大,其中黏粒含量是主要影响因素。黏粒在土壤中有吸附水分和胀缩的功能,起了阻碍水分下渗和堵塞土壤孔隙的作用。分析结果表明该土壤黏粒含量较高,土壤较为板结,且自上而下土壤黏粒含量逐渐增加。由图 5 可知,土壤饱和导水率和饱和含水量与黏粒含量间存在显著的负相关关系,这与邓建才^[13]的结果一致,表明土壤质地越黏,土粒越细、排列紧密,通气排水不良,因而土壤的饱和导水率就越低。而与易军^[11]等的研究结果不一致,可能是因为研究的土壤类型不同而导

致的结果不同。因为质地黏重的土壤，土粒细且排列紧密，表面积大，持水性较强，相反外部的水分也很难进入土体内部，因而在水分饱和的情况下，黏粒含量越高的土壤，含水量越低。

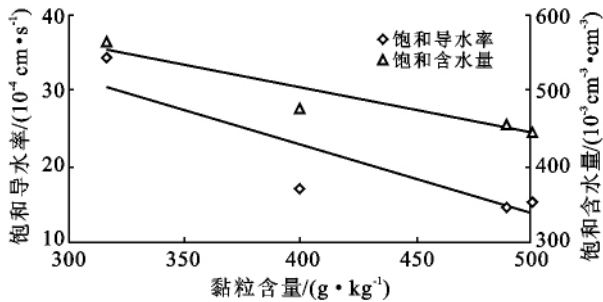


图 5 研究区旱地红壤黏粒含量与水力学特性的关系

2.2.4 土壤结构对水力学特性的影响 由图 6 可知，旱地红壤的饱和含水量与土壤的结构系数呈显著正相关关系。土壤结构系的好坏通常用结构系数来表示，数值越大，结构性越好，水稳性越高，孔隙度和持水性越大，有利于土壤的通气透水，提高土壤导水性能^[4,14-15]，因此保持水分的能力越强，含水量越高。旱地红壤土壤结构系数与有效水含量呈显著的正相关关系，表明结构系数也是影响土壤有效水含量的重要因素之一，结构越好的土层，能提供给作物利用的有效水含量越高，因此在改良红壤的一个重要方面就是改善红壤的不良结构，比如选择较好的作物会提高土壤中的作物根系活性及分布，使得土壤具有更好的持水性^[15]。

2.3 旱地红壤饱和导水率与土壤持水特性的关系

由试验结果可知，研究区旱地红壤饱和导水率和土壤的持水特性呈极显著正相关关系，饱和导水率越高的土层，其饱和含水量越高，土壤持水性越强，这与

旱地红壤的容重和黏粒含量低、有机质含量和结构系数高等因素有关。该研究结果未见报道，因此需要进一步研究证实。

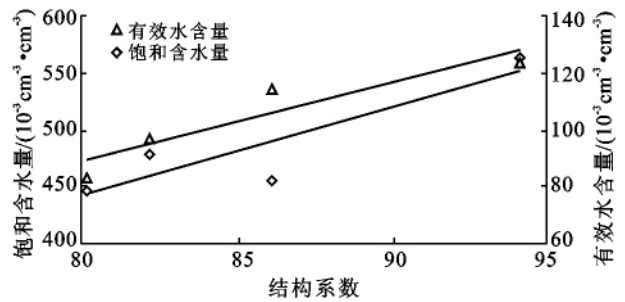


图 6 研究区旱地红壤结构系数与水力学特性的关系

2.4 旱地红壤水力学特性的影响因素的主成分分析

影响旱地红壤水力学特性因素较多，而且由于土壤各理化性质之间存在相互作用，导致各个因素对水力学特性的影响十分复杂。采用 SPSS 16.0 统计分析软件中的主成分分析方法，分析土壤不同的理化性质对土壤水力学参数的影响，能更清楚地了解其中的主导因素。

由表 3 可知，第一主成分分析范畴中的特征值为 5.77，在整个因素中方差贡献率为 82.47%，即可解释土壤物理性质之间的 82.46% 的情况。容重和总孔隙度负荷量最大，故以容重和孔隙度为主要影响旱地红壤水力学参数的因素。第二主成分分析范畴中特征值为 1.05，方差贡献率为 14.94%，其在影响旱地红壤水力学参数中的作用较小，这两个主成分的累积贡献率达到了 97.41%，即可对原影响土壤水力学特性因素的 97.40% 的情况进行解释。因此，容重和孔隙度为影响土壤水力学特性的主要因素，其它如质地和有机质含量则为次要因素。

表 3 各主成分中各影响因素负荷

特征值	贡献率/%	主成分	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	结构系数/%	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	黏粒含量/(g·kg ⁻¹)	粉粒含量/(g·kg ⁻¹)	砂粒含量/(g·kg ⁻¹)
5.77	82.47	1	-0.96	0.96	0.92	0.83	-0.95	0.84	0.88
1.05	14.94	2	0.26	-0.26	-0.39	0.52	-0.29	0.54	-0.35

3 结论

(1) 旱地红壤饱和导水率的变化范围是 1.44 × 10⁻³ ~ 3.45 × 10⁻³ cm/s，并呈现出自上而下减小的趋势，表层的饱和导水率远大于其它各土层。

(2) 旱地红壤的水分特征曲线中，耕作层土壤在受到水吸力后，含水量急剧下降，由开始的最高变为最低，这种趋势持续到 1.50 × 10⁶ Pa，而犁底层和网

纹层的变化趋势较为平缓。其中耕作层有效水含量最高。

(3) 影响旱地红壤水力学特性的因素有容重、孔隙度、质地、有机质和结构系数，其中容重和质地与水力学特性呈显著负相关，有机质含量和结构系数与水力学特性呈显著正相关关系，其中容重和孔隙度为主要影响因素，其余为次要因素；

(4) 旱地红壤饱和导水率与土壤的持水特性呈

极显著正相关关系,土壤导水性能越强、土壤所保持水分越多。研究结论可为了解和研究旱地红壤土壤水分基本状况、改善旱地红壤的季节性干旱、增加保水保肥能力等提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] Rattan L. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000,165(3):191-207.
- [2] 陈效民,潘根兴,沈其荣,等. 太湖地区主要水稻土的土壤水分参数研究[J]. 水土保持学报,2001,15(4):96-96,125.
- [3] 徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):494-501.
- [4] 白冰,陈效民,秦淑平. 黄河三角洲滨海盐渍土饱和导水率的研究[J]. 土壤通报,2005,36(3):321-323.
- [5] 姚贤良. 华中丘陵红壤的水分问题: I. 低丘坡地红壤的求分状况[J]. 土壤学报,1996,33(3):249-256.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2008.
- [7] 吴华山,陈效民,叶民标,等. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2005,19(1):181-187.
- [8] Tompkin T M. Wetland Effects on Hydrological and Water Quality Characteristics of A Mid-Michigan River System[M]. Florida: Crc. Press,1997:273-283.
- [9] 李惠娣,杨琦,聂振龙,等. 土壤结构变化对包气带土壤水分参数的影响及环境效应[J]. 水土保持学报,2002,16(6):100-102,106.
- [10] 党进谦,李靖. 非饱和黄土含水量与基质吸力的关系关系[J]. 水土保持通报,1995,15(4):39-42.
- [11] 易军,尚三林,杨正礼. 宁夏黄灌区灌淤土水力参数研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):46-49.
- [12] 吕殿青,潘云. 南北方黏质土壤的水分特征研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(1):20-23.
- [13] 邓建才,陈效民,张佳宝,等. 黄淮海平原主要土壤水力参数的研究[J]. 灌溉排水学报,2002,21(3):1-3,7.
- [14] 沃飞,蔡彦明,田颖,等. 天津市不同种植年限蔬菜地土壤水分特征影响因素及其演变[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(1):11-15.
- [15] 方堃,陈效民,杜臻杰,等. 低山丘陵区红壤水分的动态变化及影响因素[J]. 农业工程学报,2010,26(1):67-72.
- [9] Katerji N, van Hoorn J W, Hamdy A, et al. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods[J]. Agricultural Water Management, 2003,62(1):37-66.
- [10] Tedeschi A, Dell'Aquila R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2005,77(1/3):308-322.
- [11] Karin. The effect of NaCl on growth, dry mater allocation and ion uptake in salt marsh and inland population of America Maritima[J]. New phytol.,1997,135(2):213-225.
- [12] 张妙仙,杨劲松. 灌溉入渗条件下农田土壤水盐动态简化模型及应用[J]. 土壤学报,2002,39(1):81-88.
- [13] 邵玉翠,张余良,李悦,等. 微咸水农田灌溉技术研究[J]. 天津农业科学,2003,9(4):25-27,35.
- [14] 逢焕成,杨劲松,严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(6):599-603.
- [15] 王洪彬. 沧州地区利用地下微咸水灌溉分析[J]. 河北水利水电技术,1998(4):4-5.
- [16] 陈欢,王淑娟,陈昌和,等. 烟气脱硫废弃物在碱化土壤改良中的应用及效果[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(4):38-42.
- [17] 高玉山,朱知运,毕业莉,等. 石膏改良苏打盐碱土田间定位试验研究[J]. 吉林农业科学,2003,28(6):6-31.
- [18] 潘保原,曹越. 不同剂量的酒糟对盐碱土壤改良的作用[J]. 环境科学管理,2009,34(10):35-37.
- [19] 张金柱,郭春景,张兴,等. 生物有机肥对中度盐碱土壤理化性质影响的研究[J]. 湖北农业科学,2008,47(12):1420-1422.
- [20] 邵玉翠,张余良,李悦,等. 天然矿物改良剂在微咸水灌溉土壤中应用效果的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):100-103.
- [21] 邵玉翠,任顺荣,廉晓娟,等. 有机-无机土壤改良剂对滨海盐渍土降盐防碱的效果[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1527-1532.
- [22] 叶海燕,王全九,刘小京. 冬小麦微咸水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):27-32.
- [23] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

(上接第 20 页)