

# 表层掺黏土对砂壤土水分入渗的影响

邢杰, 张艳萍 (乌兰察布市土壤肥料站, 内蒙古乌兰察布 012000)

**摘要** [目的] 针对我国北方砂壤土水分利用效率低的特点, 通过室内模拟试验研究了砂壤土表层添加不同黏粒量对砂壤土湿润锋进程、累计入渗量、土壤剖面含水率的影响, 分析了土壤中黏粒添加量对砂壤土水分运动影响和机制, 旨在为砂壤土工程改良提供理论依据和实践指导。[方法] 通过室内土柱模拟试验, 设置常规对照(CK)以及2%、5%、10%和20% 4个掺黏量, 定水头条件下研究不同掺黏量对砂壤土水分入渗特征的影响。[结果] 砂壤土表层掺黏后, 显著减小了湿润锋进程。随着土壤表层掺黏量的增加, 湿润锋下移速率、入渗速率逐渐减慢, 累计入渗量减少。湿润锋、累计入渗量与时间之间符合幂函数关系。[结论] 在入渗过程中, 土壤表层掺黏能显著增加土壤对外界水分的蓄积量, 提高土壤的储水量。

**关键词** 砂壤土; 掺黏量; 入渗

中图分类号 S156.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2013)26-10627-03

## Effects of Clay Mixed on Soil Water Infiltration in Surface of Sandy Loam

XING Jie et al (Soil and Fertilizer Station of Ulanqab City, Ulanqab, Inner Mongolia 012000)

**Abstract** [Objective] In view of the low efficiency of water use in northern sandy loam soil, through laboratory experiment, the effects of loam surface adding different amount of sticky situations on sandy loam soil wetting front process, cumulative infiltration, moisture content of the soil profile were integrated, and soil clay content on the sandy loam soil water movement effects and mechanisms were analyzed. The research aimed to provide a theoretical basis for improving sandy loam engineering and practical guidance. [Method] A laboratory soil cylinder simulation experiment was carried out to investigate the impacts of clay mixed sandy loam on soil infiltration and soil moisture. [Result] The sandy loam mixed with sticky surface significantly reduced the wetting process. With the increase of the amount of topsoil mixed with sticky, moist peaks down rate, infiltration rate, cumulative infiltration gradually slowed down. Wetting front, between cumulative infiltration and time met power function. [Conclusion] Infiltration process, sticky soil surface doping could significantly increase soil moisture accumulation on the outside, and improve soil water storage.

**Key words** Sandy loam soil; Clay mixed; Infiltration

内蒙古自治区气候干旱, 蒸发强烈, 年均降雨量从东到西由 500 mm 递减至 50 mm。由于受成土母质和长期风蚀作用的影响, 土壤表层(0~30 cm)呈砂性, 砂粒含量一般高于 55%, 黏粒含量低于 20%, 土壤饱和导水率高, 入渗量大, 耕作层水分储量少, 有效水分含量低, 蒸发第一阶段蒸发量大<sup>[1]</sup>。因此, 直接导致砂壤土的水分利用效率低。

在农田中, 土壤剖面极少呈均一分布, 总是不同质地、不同结构、不同容重相互交错组成。层状土土壤质地、结构、容重等的不均一性必然导致土壤水分在入渗过程中的差异。当细质土存在于粗质土之上时, 入渗在土壤水势作用下向下移动。在积水入渗前期, 湿润锋在导水率较小的上层细质土壤中, 此时湿润锋处土壤基质吸力很大, 而当湿润锋到达砂土界面处时, 湿润锋暂停于界面, 随着水分逐渐下渗, 细质土逐渐趋于饱和, 基质势逐渐减小, 实际上是为下层粗质土提供了一个非充分的水源, 形成一个小于粗质土的饱和导水率的稳定入渗过程。由于提供了一个非充分的水源, 粗质土中只有部分孔隙起到导水作用, 出现局部的水流, 形成开始均匀分布的流线趋向于在空间上形成分离的流线即“指流”<sup>[2-5]</sup>。像这种夹砂的层状土壤剖面结构, 入渗土壤水盐在界面处发生滞留现象。这主要是与不同质地土壤的进气吸力和非饱和导水率有关, 视层位、厚度、粒径搭配而定。

不管是细质土覆盖粗质土还是粗质土覆盖细质土入渗能力均改变了原先均质土的入渗特征。在细质土覆盖粗

质土时, 其入渗能力相比原先的粗质土入渗能力要小, 当粒径的变异值达到一定程度时会发生指流现象, 即在界面处发生入渗转折。砂壤土表层掺黏土之后, 形成了上黏、下砂的层状土壤结构。内蒙古干旱和半干旱区砂壤土掺黏工程改良已被农户所认可, 且效果较好。工程措施下黏土混合量、混合厚度对土壤水分入渗的影响, 就其量化上(工程掺黏比例)尚不明确, 也鲜有关于此的报道。因此, 笔者从单因素着手定量研究掺黏量对土壤的水分运移的影响, 旨在为内蒙古干旱和半干旱区砂壤土水分高效利用提供理论支持和技术指导。

## 1 材料与方法

**1.1 供试材料** 供试土壤采自内蒙古乌兰察布市集宁区马莲渠乡黄家村的典型砂壤土休闲地土壤, 采集表层 0~30 cm 土样, 土壤样品经风干、碾压、去除杂物后过 2 mm 筛。试验用黏土同样采自砂壤土下层 60~100 cm, 黏土经过风干、去除杂物后过 2 mm 筛。砂壤土和黏土按照预设处理, 混合后的机械组成和土壤质地见表 1。土壤的质地命名采用国际制法。

表 1 供试土壤、黏土、两者混合颗粒组成

处理	土壤质地	各级粒径的颗粒百分含量//%		
		砂粒(2~0.02 mm)	粉粒(0.02~0.002 mm)	黏粒(<0.002 mm)
土壤 1	砂壤土	81.01	11.30	7.69
土壤 2	重黏土	11.26	26.37	62.37
2% 掺黏	砂壤土	79.62	11.60	8.78
5% 掺黏	砂壤土	77.52	12.05	10.42
10% 掺黏	砂壤土	74.04	12.81	13.16
20% 掺黏	壤土	67.06	14.31	18.63

**作者简介** 邢杰(1965-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级农艺师, 从事植物营养学方面的研究, E-mail: xinjie3414@126.com。

**收稿日期** 2013-07-05

**1.2 试验设计和操作过程** 开展室内土柱模拟试验。设置常规对照(CK)以及2%、5%、10%和20% 4个掺黏量。土壤水分入渗试验装置包括有机玻璃土柱、方形马氏瓶、铁架台。试验土柱采用8 mm厚有机玻璃材料制作,内径为15 cm,高为50 cm。土柱侧面5 cm以下,每隔5 cm开一对圆形取样口,在垂直方向上呈90°错开,其直径15 mm,便于取样分析。整个试验过程利用马氏瓶供水,其截面积为100 cm<sup>2</sup>,高为50 cm。装土时,先在有机玻璃土柱底部装5 cm厚、干净的2~5 mm的砾石。一是为了模拟当地自然条件下砾石存在情况;二是在入渗过程中提供一个气流顺畅的入渗环境,并在土柱底部设有排气阀门。为了防止上层土粒掉入下层,装土前在砾石上层铺2层滤纸。装土完毕后,在土体顶部上放置2张滤纸,防止入渗时对土面的冲溅。将土壤按照设定容重1.5 g/cm<sup>3</sup>分层(每层5 cm)装入土柱中,并在层与层之间刨毛,掺黏厚度为20 cm。利用马氏瓶供水,水头为4 cm,水质为去离子水。在入渗过程中记录湿润锋和马氏瓶水位变化量,控制湿润锋深度为40 cm,当达到时停止入渗,立即从取样口取出土样,取样的位置分别为5、10、15、20、25、30、35、40 cm处,并于烘箱中105~108℃烘干6~8 h后计算各层含水量。

## 2 结果与分析

**2.1 砂壤土表层掺黏量对土壤湿润锋进程的影响** 图1描绘了土壤表层掺黏土条件下湿润锋进程。在2%~20%掺黏量的条件下,土壤湿润锋随入渗时间的进程均小于0(对照)。与对照相比,2%掺黏处理对湿润锋进程的抑制作用非常明显,随着掺黏量的进一步提高,湿润锋下移速率明显减慢。当湿润锋到达预定深度( $h$ )40 cm时,0、2%、5%、10%、20%掺黏处理所用的时间分别为40、70、120、260、420 min。表层20%掺黏影响最大,湿润锋深度达到同一预设值时所用时间几乎为对照所用时间的10倍。对湿润锋与时间二者关系进行拟合,符合幂函数,即

$$F = at^b \quad (1)$$

式中, $F$ 为湿润锋下移距离,cm,取正数; $t$ 为入渗时间,min; $a$ 、 $b$ 为拟合参数,其中 $a$ 为第一个计时单位后的湿润锋的推进距离, $b$ 为湿润锋进程的衰减程度。对掺黏处理的拟合见表2,其决定系数 $R^2$ 均大于0.98,显著性检验( $P < 0.01$ )。在湿润锋与时间变化过程中,随着掺黏粒量的增加, $a$ 出现减小的趋势(7.292 8~1.446 2),而 $b$ 呈增大趋势(0.439 6~0.522)。这主要是由于随着黏粒含量的增加,土壤非毛管孔隙度减小,土壤基质势变大,使得土壤入渗速率降低。因此,土壤表层掺黏后土壤的水分进程显著减小,有效降低水分进入土壤下层的能力和强度。

**2.2 砂壤土表层掺黏量对土壤水分累计入渗量的影响** 图2为在土壤表层20 cm在掺黏处理下,不同的掺黏粒量对土壤累积入渗量的影响。累积入渗量曲线与湿润锋变化规律一致,2%~20%的掺黏量可以显著减少砂壤土水分累积进入土层的量。随着掺黏量的增加,累积入渗量逐渐减小。当入渗到掺黏界面时,0、2%、5%、10%、20%掺黏的土壤的累计入渗量分别为6.47、8.01、9.32、11.24 cm,各处理间增幅在

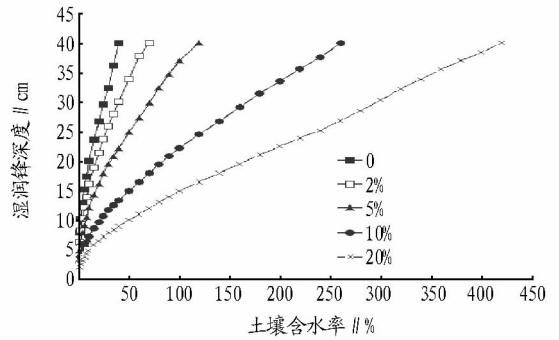


图1 掺黏量对土壤湿润锋深度的影响

0.05水平显著,增幅分别为对照的1.24、1.44和1.74倍。这说明在土壤剖面掺黏层能显著增加土壤对外界水分的蓄积量,提高土壤的储水量。再以时间为例,当土壤入渗时间为40 min时,即入渗时间很短的情况下(对照已经到达入渗控制深度),0、2%、5%、10%、20%掺黏处理累计入渗量分别为11.05、9.95、8.70、6.61、5.62 cm,在0.05水平显著地减小了土壤入渗量。

表2 曲线拟合系数

掺黏量//%	$a$	$b$	$R^2$
0	7.297 8	0.439 6	0.992 4
2	5.764 8	0.445 7	0.994 9
5	4.218 9	0.457 5	0.994 6
10	2.358 0	0.488 6	0.991 7
20	1.446 2	0.552 0	0.986 6

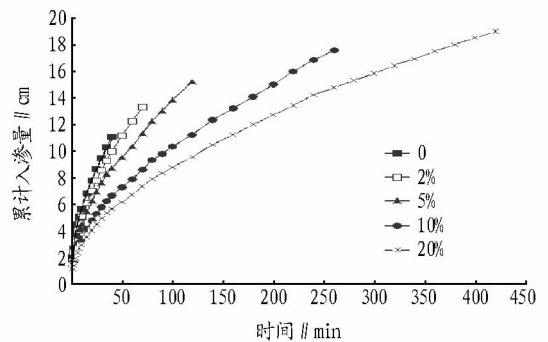


图2 掺黏量对累积入渗量的影响

土壤表层加黏后构成双层土壤结构,但从累计入渗过程分析,其累计曲线与均质土的累计曲线相符。Kostiakov入渗模型是较理想的入渗经验模型,对累积入渗量随时间的变化具有很高的拟合决定系数。

Kostiakov入渗模型的具体表达式为:

$$i = \alpha t^{-\gamma} \quad (2)$$

$$I = \alpha / (1 - \gamma) t^{1-\gamma} \quad (3)$$

式中, $i$ 为入渗率,cm/min; $t$ 为入渗时间,min; $I$ 为累积入渗量,cm; $\alpha$ 、 $\gamma$ 均为入渗拟合参数。

因此,针对非均质土壤的入渗曲线利用Kostiakov模型拟合,拟合方程见表3。分析拟合方程,发现方程均有较好的拟合效果,其决定系数均高于0.99, $\alpha/(1-\gamma)$ 值随掺黏量的增加而减小,曲线逐步变缓, $1-\gamma$ 值随掺黏量的增加而出现增加的趋势,即衰减程度逐渐增加。

表3 曲线拟合系数

掺黏量/%	拟合方程	R <sup>2</sup>
0	$y = 1.931x^{0.4664}$	0.999 1
2	$y = 1.7158x^{0.4743}$	0.998 8
5	$y = 1.5254x^{0.4726}$	0.999 1
10	$y = 1.1304x^{0.4831}$	0.998 5
20	$y = 0.9408x^{0.491}$	0.998 5

**2.3 砂壤土表层掺黏量对土壤水分入渗速率的影响** 由于试验达到设定同一湿润锋时的时间不同,且为非均质土,在入渗最后阶段5个点的平均值为稳定入渗速率。由图3可知,0.2%、5%、10%、20%掺黏处理在入渗到砂土界面处时各个处理的入渗速率分别为0.275 0、0.193 5、0.129 4、0.069 0、0.039 0 cm/min,当湿润锋到达40 cm时(设定入渗深度),土壤稳定入渗速率分别为0.172 0、0.124 7、0.083 6、0.043 5、0.025 9 cm/min。由于砂层的存在,在10%和20%掺黏处理的后期入渗速率相对稳定,且随掺黏量的增加,入渗速率的衰减程度变小。因此,砂壤土表层掺黏后,土壤湿润锋进程速率显著减小,显著改善了砂壤土的湿润过程。

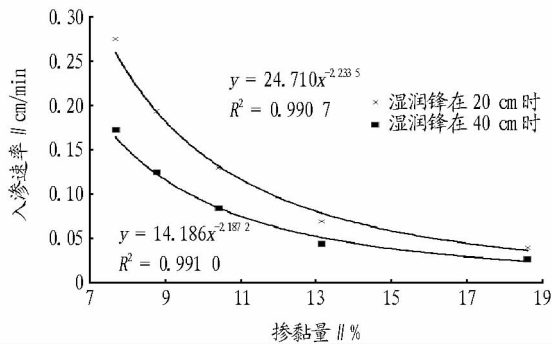


图3 在不同湿润锋区域掺黏量对土壤入渗速率的影响

**2.4 砂壤土表层掺黏量对土壤剖面含水量的影响** 图4是不同掺黏量土柱定水头入渗到土面以下40 cm刻度线后瞬时土壤含水量在不同层次的分布情况。从图中可以看出,不同掺黏量对湿润土体含水量分布有较大的影响。在各个土柱中,土壤含水率从表层逐渐递减。这符合土壤定水头入渗下土壤含水率分布。从图中还可以看出,随着掺黏量的增加,各个层次的土壤含水率逐渐增大。0.2%、5%、10%、20%掺黏处理中土柱总的蓄水量分别为11.04、12.53、14.27、17.11、18.41 cm,各个掺黏量与对照的土壤蓄水量增加显著,最大掺黏量(20%)是对照的1.67倍。

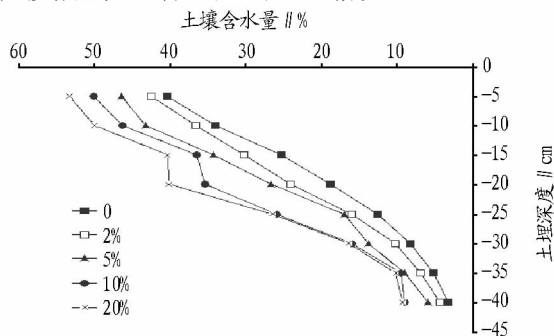


图4 掺黏量对土壤剖面含水量的影响

在0~20 cm的掺黏层,土壤剖面含水量随着黏粒含量的增加而增加。这主要是由于增加了黏粒含量,即增加了土壤有效蓄水孔隙度。而在土壤下层20~40 cm时,砂壤土含水量也与掺黏层具有一致的变化特征。这主要是由于增加了土壤的入渗时间和水通量,随着掺黏量的增加,下层砂壤土逐渐产生“指流特征”,尤其在10%和20%掺黏处理中,在界面处有显著地能量蓄积过程,致使水分快速进入下层。

### 3 结论与讨论

入渗是指水分进入土壤的过程,如降水或灌溉产生的垂直入渗等。它是大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节。土壤水分入渗能力可反映一个地区土壤质量的好坏,如一个地区土壤砂粒含量太高(高于70%),则土壤入渗能力大,使得土壤水、溶质渗漏严重,显著影响农田灌水利用效率,降低土壤的蓄水能力和供水效率;若一个地区土壤黏粒含量太高(高于30%),则土壤入渗能力低,灌溉水和降水难以通过地表进入土体,易发生产流,降低水分利用效率。因此,如何调控不同类型土壤的入渗特征将对改善农田水分循环具有重要的意义和作用。

众所周知,表层土壤是农田养分和水分主要的载体,因此科研工作者将改土的研究主要聚集于土壤表层。在黏粒含量较高的土壤,施加有机质、土壤结构、添加砂土、深耕、施加改良剂等可以显著地提高土壤表层的入渗能力,提高水分的利用效率<sup>[6-9]</sup>。而在砂壤土区,由于土壤水分的快速入渗,水分进入土壤耕作层的量较少,即有效含水量少。在砂粒含量较高的土壤区,施加土壤有机质、土壤结构改良剂(保水剂)、增施黏粒<sup>[8-10]</sup>等可以显著地减弱砂壤土表层的入渗能力,提高砂壤土水分蓄积容量。通过增加土壤有机质和土壤改良剂改良砂壤土的周期长和投资大,难以达到预期的目标。据此,该研究采用土柱法定量研究掺黏量对砂壤土水分入渗规律的影响和效果。所得结果与前人相似,但缺乏大田实践。

土壤表层掺黏后,湿润锋随入渗时间的进程均小于对照。随着掺黏量的进一步提高,湿润锋下移速率明显减慢。对湿润锋与时间二者关系进行拟合,符合幂函数关系。随着掺黏量的增加,累积入渗量逐渐减小,2%的掺黏量即可起到显著效果。上细下粗非均质土壤的累计入渗过程可用Ostia模型拟合。土壤剖面掺黏层能显著增加土壤对外界水分的蓄积量,提高土壤的储水量,在同一入渗层最大掺黏量(20%)是对照砂壤土的1.67倍。

### 参考文献

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 89-120.
- [2] 张建丰, 王文焰. 砂层在黄土中发生指流条件的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 82-86.
- [3] 张建丰, 王文焰, 汪志荣. 具有夹砂层土壤入渗计算[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 27-30.
- [4] HILLEL D, BAKER R S A. Descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Science, 1988, 146(1): 51-55.
- [5] HILLEL D E, PARLANGE J Y. Wetting front instability in layered soils[J]. Science Society American Proceeding, 1972, 36(5): 697-702.

(下转第10631页)

根部 Pb 积累量最大的为火炬鸡冠,红穗苋和红苋菜根部 Pb 富集能力无显著差异。

表 3 参试花卉的 Pb 积累特征 mg/kg

植物	处理	根	茎	叶	花	地上部
火炬鸡冠	CK	26.23	19.91	43.57	20.72	27.00
	Pb	1 021.65	485.14	626.27	42.15	360.11
红苋菜	CK	19.80	3.15	7.79	14.66	3.28
	Pb	491.67	80.01	21.02	14.74	44.76
红穗苋	CK	8.96	6.77	15.70	0.50	9.14
	Pb	453.27	140.95	35.56	3.73	97.44

3 种花卉根部及地上部 Pb 含量均极显著高于对照 ( $P < 0.01$ )。其中,Pb 污染组火炬鸡冠的根、茎、叶、花中 Pb 含量分别为对照的 38.9、24.4、14.4、2.0 倍,地上部整体 Pb 含量为对照的 13.3 倍;红苋菜的根、茎、叶、花中 Pb 含量分别为对照的 24.8、25.4、2.7、1.0 倍,地上部整体 Pb 含量为对照的 13.6 倍;红穗苋的根、茎、叶、花中 Pb 含量分别为对照的 50.6、20.8、2.3、7.5 倍,地上部整体 Pb 含量为对照的 10.7 倍。

**2.1.2 土壤铅污染对花卉转移系数、富集系数的影响** 由表 4 可知,火炬鸡冠 Pb 的富集系数大于 0.3,具有较强的 Pb 积累能力,但这些花卉植物的富集系数均小于 1,对 Pb 超积累能力较弱;转移系数也均小于 1,表现为根部重金属 Pb 含量大于地上部 Pb 含量,向地上部转移 Pb 的能力较差。

表 4 花卉植物铅的转移及富集系数

植物	转移系数	富集系数
火炬鸡冠	0.35	0.36
红苋菜	0.09	0.04
红穗苋	0.21	0.10

**2.2 土壤铅污染对花卉生物量的影响** 由图 1 可知,铅污染对 3 种花卉的地上部生长具有一定的抑制作用。火炬鸡冠污染组地上部生物量低于对照,但与对照之间无显著差异;Pb 污染对红苋菜和红穗苋生长的抑制作用明显,与对照间的差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。3 种花卉中火炬鸡冠对 Pb 的耐性较强,可用作 Pb 污染土壤的稳定修复植物。

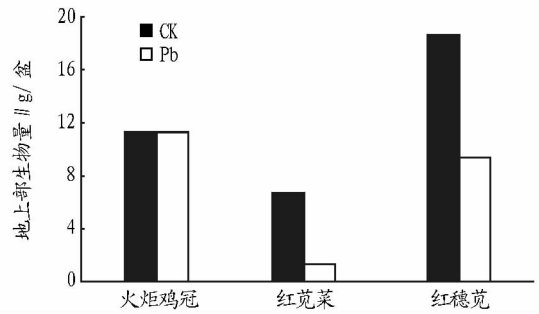


图 1 铅污染对 3 种观赏花卉地上部生物量的影响

### 3 结论

研究表明,3 种苋科花卉植物的 Pb 富集系数和转移系数均小于 1。火炬鸡冠地上部富集 Pb 能力最强,其次为红穗苋,红苋菜 Pb 富集能力最弱;根部 Pb 积累量最大的为火炬鸡冠,红穗苋和红苋菜根部 Pb 富集能力无显著差异。火炬鸡冠 Pb 耐性较强,可用作 Pb 污染土壤的稳定修复植物。

### 参考文献

- [1] 孙铁珩,周启星,李培军. 污染生态学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] 柳丹,潘凡,杨肖娥. 铅富集植物对铅的吸收及其耐性生理机制进展研究[J]. 池州学院学报,2007,21(5):88-91.
- [3] 周启星,宋玉芳. 植物修复的技术内涵及展望[J]. 安全与环境学报,2001,1(3):48-53.
- [4] CUI S,ZHANG T A,ZHAO S L, et al. Evaluation of three ornamental plants for phytoremediation of pb-contaminated soil[J]. International Journal of Phytoremediation,2013,15(4):299-306.
- [5] TURGUT C,PEPE K M,CUTRIGHT T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd,Cr, and Ni from soil using Helianthus annuus [J]. Environmental Pollution,2004,131(1):147-154.
- [6] CUI S,ZHOU Q X. Effects of exogenous chelators on phytoavailability and toxicity of Pb in Zinnia elegans Jacq [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,146(1):341-346.
- [7] 崔爽,周启星,李萍,等. 几种观赏花卉对土壤铅的吸收特性和抗性能力研究[J]. 江西科学,2009,27(1):157-160.
- [8] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [9] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [10] WEI S H,DA SILVA J A T,ZHOU Q X. Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,150(3):662-668
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

(上接第 10629 页)

- [6] 解文艳,樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(4):381-384.
- [7] 解文艳,樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(5):537-540.
- [8] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的实验

- 研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3):188-190.
- [9] 杨培岭,王勇,李云开,等. 农业化控节水技术原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [10] ZAYANI K,BOUSNINA H,MHIRI A, et al. Evaporation in layered soils under different rates of clay amendment[J]. Agricultural Water Management,1996,30:143-154.