

不同沙化土地改良材料对沙化土壤热量传递的影响

张璐琪, 赵展恒, 王玉娇, 梁玉祥

(四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: [目的] 研究不同土地改良材料对沙化土壤热量传递关系的影响, 以便有效保墒和防治沙漠化。[方法] 分别将 4 种沙化土地改良材料(无机性沙化土地改良材料、综合性沙化土地改良材料、石膏性沙化土地改良材料、高碳性沙化土地改良材料)按一定比例(5%, 7%, 9%, 11%, 12%)与沙化土壤进行混合配制, 通过模拟稳态辐射作为土壤沙化过程的热推动力, 测定不同土层深度, 不同成分的沙化土壤温度。[结果] 不同材料的添加导致土壤导热率发生改变; 在 -4~ -8 cm 土层, 4 种材料以不同比例添加至沙土中后, 对导热率的影响为: 石膏性沙化土地改良材料 > 无机性沙化土地改良材料 > 高碳性沙化土地改良材料 > 综合性沙化土地改良材料。综合性沙化土地改良材料在该土层范围内最适宜的添加比例为 9%。[结论] 综合性沙化土地改良材料和高碳性沙化土地改良材料对沙化土壤的改良效果较佳。

关键词: 沙化土壤; 热量传递; 土壤导热率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)02-0163-04

中图分类号: S152.8

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.032

Effects of Different Improvement Materials on Heat Transmission of Desertification Soil

ZHANG Luqi, ZHAO Zhanheng, WANG Yujiao, LIANG Yuxiang

(College of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: [Objective] The objective is researching different land improvement material's impacts on the heat transmission of desertification soil in order to maintain soil water and control land desertification. [Methods] Using four different improvement materials (inorganic soil improvement material, integrated soil improvement material, gypseous soil improvement material, high-carbon soil improvement material) mixed with desertification soil in different proportions (5%, 7%, 9%, 11%, 12%, respectively). Steady state radiation was presumed as the heat impetus of soil degradation process, temperatures in different soil depths and compositions were measured. [Results] Addition of different materials led to the change of soil thermal conductivity. In the depths of -4~ -8 cm, the effects on the thermal conductivity of four materials' addition in different proportion to the soil were: gypseous soil improvement material > inorganic soil improvement material > high-carbon soil improvement material > integrated soil improvement material. The best proportion of adding the integrated soil improvement material to the soil in -4~ -8 cm depth was 9%. [Conclusion] Integrated soil improvement material and high-carbon soil improvement material are better modified materials for improving desertification soil.

Keywords: desertification soil; heat transfer; soil thermal conductivity

若尔盖草原是黄河上游的重要源头水源区, 对黄河上游的水源涵养与补给及生态平衡的维持起着极其重要的作用。若尔盖草原不仅对区域气候变化响应强烈, 而且对改善区域生态环境和保障区域社会经

济可持续发展具有重大意义。然而近年来, 若尔盖气候呈现出变暖趋干的特征, 草地沙化速度显著加快, 年均递增率高达 14.11%^[1], 如何保墒治沙已成为现今面临的最为严重的生态环境问题之一。对土壤进

收稿日期: 2014-01-14

修回日期: 2014-04-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“多孔层状硅酸盐治沙环境材料构型条件”(50872085)

第一作者: 张璐琪(1987—), 女(汉族), 吉林省吉林市人, 硕士研究生, 研究方向为土地盐碱化治理和退化地改良新材料的开发和应用。

E-mail: zlxqxd110@163.com

通信作者: 梁玉祥(1958—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事地表生态修复研究。E-mail: lyxgs623b@163.com

行水、气、热平衡调控是土壤退化及沙化治理领域的关键技术之一,其中对土壤热特性的研究是最重要的一个因素。目前,国内外学者对退化土壤的热特性研究已经进行了大量的工作^[1-5],但仍存在一些局限:一是偏重于对野外开放性环境下的特定区域进行沙化成因或主导因子的研究;二是研究多从理论和试验上证实土壤热特性与其含水率、含盐量及水吸力等因素间的相关性,但在如何改善土壤传热特性上的研究上则较少;三是对退化、沙化土壤的修复过程、机理及影响因素研究工作不足。

地—气界面的热量交换是维持土壤生态体系平衡的要素之一。若将土壤视为控制体^[6],根据“三传原理”,土壤通过其控制面与外界环境进行能量、质量以及动量传递。太阳通过辐射将热量带入土壤控制面—土壤表层,土壤得到热量后,一部分散失到大气中,一部分用于土壤水分的蒸发,还有一部分传向土壤深层,剩下的便提高土壤本身的温度。当土壤获得或散失一定的热量后,土壤温度升降的多少取决于土壤的热容量,土壤传热的快慢则取决于土壤的导热率。根据二者的关系,可以用热扩散率(K)来表示^[7]

$$K = \frac{\lambda}{C_v} \quad (1)$$

式中: K ——土壤热扩散率(m^2/s); λ ——土壤的导热率 $[\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m}^1)]$; C_v ——土壤体积热容量 $[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)]$ 。土壤导热率取决于土壤固、液、气三相组成及其比例,以及孔隙度大小,固体颗粒排列方式,固相和液相界面的接触程度等。温度作为物体所含有热量多少的一种量度,其变化是土壤中水分蒸发和溶质运移、转化的直接推动力。对于只考虑垂直一维热流,各向同性的均质连续介质,土壤内任意一层的热传输可以用 Fourier 定律^[6]来表示,即热通量正比例于该点的温度梯度:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

式中: q ——热通量 ($\text{J}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$),即单位时间通过单位截面面积的热流; T ——土壤绝对温度($^{\circ}\text{C}$); z ——土壤中垂直坐标(cm)(向下为正);负号表示热流的方向是指向温度下降的方向。当土壤内热量的流失与补偿达到满足植物正常生长的平衡时,便为土壤良性循环过程的建立提供了条件。

1 材料与方 法

1.1 试验材料的采集和处理

本文选取若尔盖地区典型沙化样地进行研究。取样时采用对角线法,将所选的每个采样单元按对角线分割并选定 5 个不同的取样点,在每个取样点处取

表层,10 和 20 cm 土样各 50 g,每个取样单元共取样 5 次。将所取取样点表层,10 和 20 cm 土样分别混合,重复此操作直到取样完成。分别将样品袋装,并带回实验室,沙化土壤样品在室内自然风干后,拣出土壤中的枯枝落叶、植物根、残茬虫体以及土壤中的铁锰结核、石灰结核或石子等,磨细,筛分,选择粒径在 60 目以下的土壤放置于干燥处,备用。试验材料包括综合性沙化土地改良材料、高碳性沙化土地改良材料、无机性沙化土地改良材料及石膏性沙化土地改良材料。

1.2 试验方法

在野外自然条件下,太阳光可以均匀直射在大面积的土壤表面,使得热量在土壤下方径向的传递不存在热量差(图 1)。本试验选择在室内进行,采用非稳态方法^[5],监测在稳定的空气流动及固定功率供热情况下,试验土柱中不同土壤内的热特性随时间瞬时变化的过程。该方法保证了单一变量的可靠性,且可以使温度梯度引起的水分运动减到最小,而不需要长时间等待热梯度恒定。试验装置如图 2 所示。

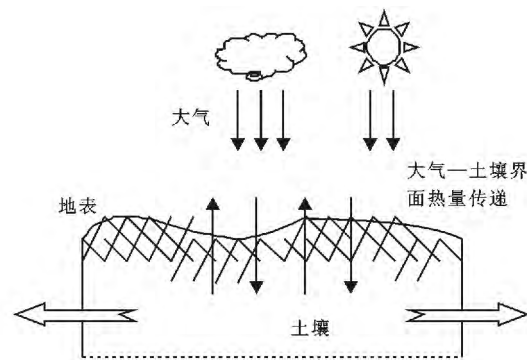


图 1 野外土壤热量传递系统示意图

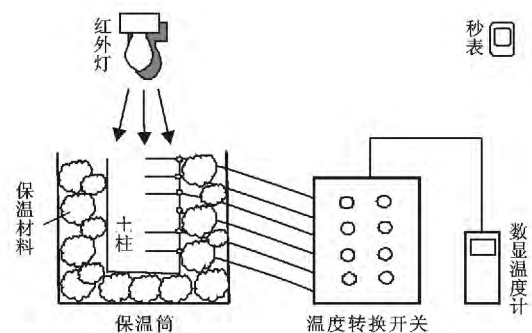


图 2 竖直一维土柱热特性试验系统

2 结果与分析

2.1 4 种材料以不同比例添加到沙化土壤的传热数据分析

土壤作为植物生长最重要的外部环境,土壤温度则是对植物种子萌发、出苗、消长、演替有重要影响的因子之一。土壤深度不同,所持有的温、光、气、水等

因素也不同,因而对植物的影响也大不相同^[8]。Fourier 热传导方程式(2)中土壤的热传导系数与土壤的质地、孔隙度和组成成分相关,因此不同改良材料的选择和添加比例会直接影响着沙化土壤的传热过程,进而关系到地表生态环境与植被的生长状况。距筒顶深 4 cm 处添加不同比例不同改良材料的混合土壤传热曲线如图 3 所示。由图 3 可知,不同成分沙化土壤温度与光照时间均存在明显的正相关关

系,对热源加热的依赖性较强,响应迅速,在光照进行了大概 10 min 后开始形成显著的温度梯度。而在前 10 min 内,由于土壤孔隙内仍残留少量的水分,热量经传导到达该层后首先用于水分的蒸发并带走了一部分热量,温度表现出微小的下降趋势。对图 3 混合土壤温度曲线进行线性拟合,经比较发现,二次多项式与试验数据拟合精度良好,相关系数 R^2 平均值达 0.988 8,因此选择二次多项式为最佳趋势方程。

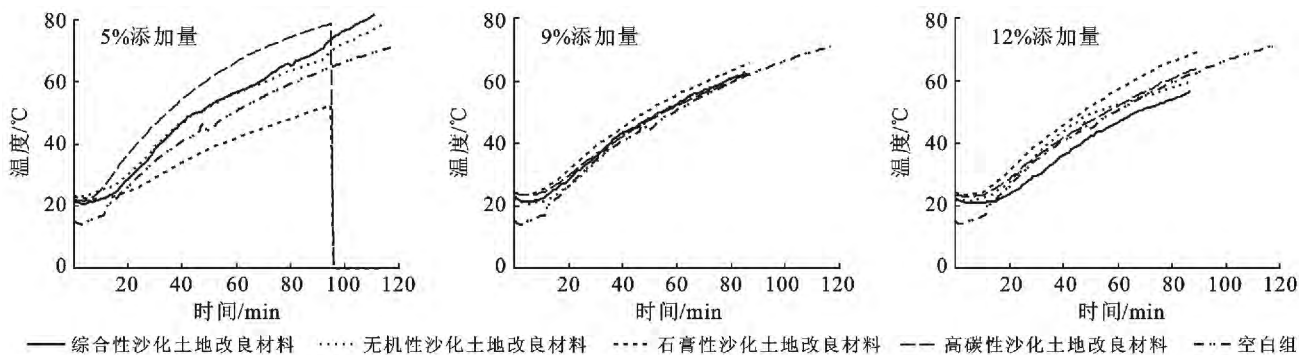


图 3 土深-4 cm 处添加不同比例各改良材料的混合沙土温度随时间变化

由温度曲线的物理意义可知,每条曲线各点的斜率代表各点的温度随时间变化的瞬时变化率,即变化率大的传热速度更快,土温变化迅速。试验时间过了约 60 min 后,土壤内温度梯度基本趋于稳定,由公式(2)可知,此时各类土壤在单位时间内的传热量大致

相等,即进入到传热推动力恒定阶段,因而取该段内某一瞬时 $x=70$ min,计算各条温度曲线在 70 min 处的斜率,即各传热曲线在 70 min 处温度的瞬时变化率,就可以比较不同材料的混合对沙化土壤导热率的影响(结果详见表 1)。

表 1 -4 cm 处添加 5%,9%,12%各材料的瞬时温度变化率数据(70 min 时)

添加比例/ %	无机性沙化土地 改良材料	综合性沙化土地 改良材料	石膏性沙化土地 改良材料	高碳性沙化土地 改良材料	空白组
5	0.462 1	0.535 1	0.359 7	0.429 0	0.445 1
9	0.480 2	0.440 7	0.434 5	0.435 4	0.445 1
12	0.339 1	0.439 9	0.488 4	0.480 6	0.445 1

根据图 3 可知,在-4 cm 土层,当添加比例为 9%时,综合性沙化土地改良材料使沙化土壤的导热率减小,高碳性沙化土地改良材料使土壤的导热率减小或基本不变,无机性沙化土地改良材料和石膏性沙化土地改良材料使沙化土壤的导热率在不同程度上有所增大。当添加比例减小到 5%时,除石膏性沙化土地改良材料使混合土壤导热率降低外,其余组均促进了沙化土壤的传热。当添加比例为 12%时,除综合性沙化土地改良材料使混合土壤导热率明显降低外,其余组均使沙化土壤的导热率增大。结合分析表 1 数据,不同配比的混合土壤中有 50%降低了沙化土壤的导热率。其中,石膏性和高碳性沙化土地改良材料施加的比例越少,混合土壤的导热率越小。综合性沙化土地改良材料组则结果相反,施加量越多越有利

于抑制土壤温度的连续上升。

图 4 为相同深度,即距筒顶 8 cm 处添加不同比例 4 种材料的混合土壤及原状土的传热曲线图。与-4 cm 处传热曲线相比,-8 cm 处土壤温度随时间变化幅度较小。在 50 min 之内,-4 cm 处的平均温度升高了总升温幅度的 60%,而-8 cm 处在该区间温度的平均升幅仅为总升温幅度的 33%,可见土壤在受到热辐射后,在垂直方向上产生的温度梯度使土柱由表层向深层形成了一个明显的热渗透区。且在 60 min 后,-4 cm 处土壤温度逐渐接近土表温度,温度梯度明显减小,而由于热传导的滞后效应,-8 cm 处土壤的温度梯度仍然很大,温度还将继续上升。在该土层,4 种材料的添加均使土壤温度较空白组有所升高,如图 4 所示,但其传热速率却各不相同。结合

表 2 在 -8 cm 处按 5%, 9%, 11% 的比例添加 4 种改良材料后土壤在 70 min 时的温度瞬时变化率可知, 添加了改良材料的混合土壤整体上对沙化土壤的传热速率有不同程度的促进作用, 其比例达到 75%。其中, 无机性和石膏性沙化土地改良材料均使混合土壤的导热率增大。而综合性沙化土地改良材料在不同配比下的混合均使沙化土壤的导热率减小, 且随施加含量的增加而明显降低。高碳性沙化土地改良材料的添加使土壤导热率减小或基本不变。

综合 -4 ~ -8 cm 土层 4 种改良材料按不同配比对沙化土壤传热特性的影响效果, 其对沙化土壤导热率的促进作用由大到小依次为: 石膏性沙化土地改良材料 > 无机性沙化土地改良材料 > 高碳性沙化土地改良材料 > 综合性沙化土地改良材料。可见黏粒比重大, 具有高吸水性的粉末状材料, 能够有效阻碍土壤的热扩散, 即阻碍热量向蒸发面的传递, 降低蒸发速率, 使植被根系层保持良好的土壤条件, 有助于沙化土壤的改良。

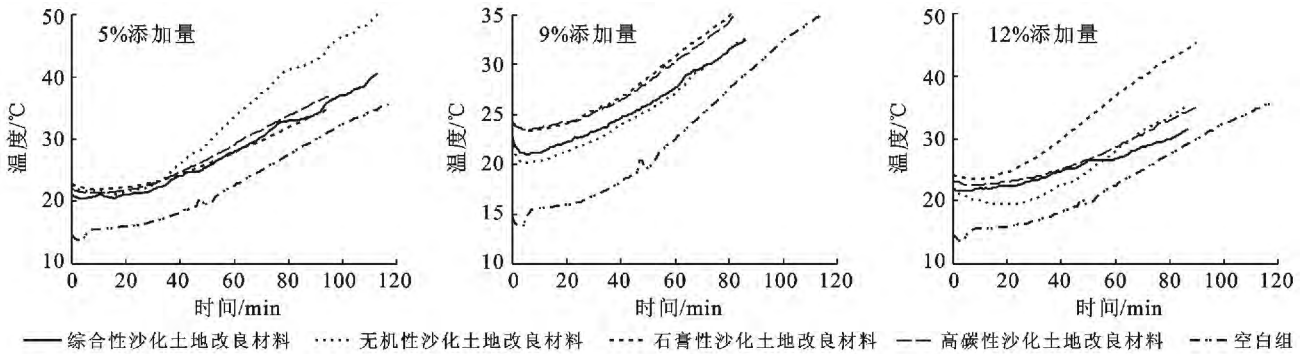


图 4 土深 -8 cm 处添加不同比例各改良材料的混合沙土温度随时间变化

表 2 -8 cm 处添加 5%, 9%, 12% 各材料的瞬时温度变化率数据 (70 min 时)

添加比例/ %	无机性沙化土地 改良材料	综合性沙化土地 改良材料	石膏性沙化土地 改良材料	高碳性沙化土地 改良材料	空白组
5	0.323 0	0.216 5	0.208 3	0.245 2	0.214 8
9	0.222 3	0.198 1	0.232 2	0.217 2	0.214 8
12	0.341 1	0.146 7	0.349 2	0.221 7	0.214 8

2.2 不同添加比例, 不同深度下土壤的传热数据与分析

由于外加材料含量的多少影响着沙化土壤的结构及孔隙度, 进而影响土壤的传热系数, 因此添加比例的选择对不同程度的沙化地区的治理工作具有重要的意义。分析可得, 施加综合性沙化土地改良材料整体上有利于减小沙化土壤的传热速度。将 -4 ~ -8 cm 的土层添加 5% ~ 12% 综合性沙化土地改良材料的瞬时温度变化率数据列于表 3。由表 3 可以

看出, 在 -4 ~ -8 cm 土层处, 添加 9% 的综合性沙化土地改良材料能够有效降低沙化土壤的导热率, 且随深度增加效果越明显; 另外, 在 -4 cm 深添加 7% 和 -8 cm 处添加 12% 的混合土壤导热率也较空白组有所下降。因此, 在该土层范围内, 综合性沙化土地改良材料最适宜的添加比例为 9%。说明在对退化、沙化土壤进行修复的过程中, 在土地改良材料的应用上要注意因地制宜以及土壤埋深与材料混合比例的问题。

表 3 -4 ~ -8 cm 处添加 5% ~ 12% 综合性沙化土地改良材料的瞬时温度变化率数据 (70 min 时)

土层/cm	温度变化率					空白组
	5%	7%	9%	11%	12%	
-4	0.535 1	0.252 7	0.440 7	0.468 9	0.439 9	0.445 1
-6	0.340 2	0.312 6	0.272 4	0.353 6	0.317 4	0.286 7
-8	0.216 5	0.240 4	0.198 1	0.245 8	0.146 7	0.214 8

3 结论

(1) 沙化土壤由于团聚作用弱, 含水率几乎为零, 孔隙率低等因素, 使它对热源照射后的温度变化

表现极端, 依赖性也比较强, 响应迅速, 在热源辐射强时温度迅速上升, 而加热消失或变弱时温度又迅速下降。

(下转第 172 页)

- plants developed from seedlings, rhizomes and at field conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 700-707.
- [2] Teng Ying, Luo Yongming, Huang Changyong, et al. Tolerance of grasses to heavy metals and microbial functional diversity in soils contaminated with copper mine tailings[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3):363-370.
- [3] 郝秀珍,周东美,薛艳,等.天然蒙脱石和沸石改良对黑麦草在铜尾矿砂上生长的影响[J].*土壤学报*,2005,42(3):434-439.
- [4] 杨先伟,张满满,王润沛,等.矿山重金属污染及植物修复研究进展[J].*科技信息*,2010(21):44.
- [5] 余贵芬,蒋新,孙磊,等.有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J].*生态学报*,2002,22(5):770-776.
- [6] 钟熹光,吴启堂,林毅.城市污泥直接施用对农田的生态效应研究初报[J].*热带亚热带土壤研究*,1992,1(2):91-98.
- [7] 郭娟兰,王逢,张青喜,等.太原市污水污泥农业利用研究[J].*农业环境保护*,1993,12(6):254-262.
- [8] 陈同斌,高定,李新波.城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响[J].*生态学报*,2002,22(6):802-807.
- [9] 孔祥生,易现封.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2008:78-79.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [11] 史树德,孙亚卿,魏磊.植物生理学实验指导[M].北京:中国林业出版社,2011.
- [12] 金树权,周金波,陈若霞,等.污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响[J].*环境科学*,2013,34(10):3969-3974.
- [13] 田胜尼,刘登义,王峥峰,等.铜尾矿对 5 中豆科植物根系生长的影响[J].*生态环境*,2005,14(2):199-203.
- [14] 李艳霞,赵莉,陈同斌.城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生产的影响[J].*生态学报*,2002,22(6):797-801.
- [15] 何冰,叶海波,杨肖娥.铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J].*农业环境科学学报*,2003,22(3):274-278.
- [16] 吴清涛,马军伟,姜丽娜,等.鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J].*农业环境科学学报*,2010,29(7):1302-1309.
- [17] 唐明灯,艾绍英,罗英健,等.有机无机配施对生菜生长及其 Cd, Pb 含量的影响[J].*农业环境科学学报*,2012,31(6):1104-1110.
- [18] 祖艳群,李元,赵娜,等.施用有机肥对小花南芥和中华山蓼生长生理和 Pb/Zn 累积特征的影响[J].*农业环境科学学报*,2013,32(3):508-516.

(上接第 166 页)

(2) 在 -4 和 -8 cm 土层处,4 种材料(无机性沙化土地改良材料,综合性沙化土地改良材料,石膏性沙化土地改良材料,高碳性沙化土地改良材料)按不同比例(5%,9%,12%)的添加整体对沙化土壤的传热速度有不同程度的促进作用,总体影响没有 0 ~ -4 cm 显著。

(3) 在 -4 cm 土层石膏性和高碳性沙化土地改良材料的施加比例越低,混合土壤的导热率越小,综合性沙化土地改良材料组则结果相反;在 -8 cm 土层综合性沙化土地改良材料随施加比例的增高,土壤导热率降低。在 -4 ~ -8 cm 土层,4 种材料对沙化土壤导热率的促进效果由大至小依次为:石膏性沙化土地改良材料 > 无机性沙化土地改良材料 > 高碳性沙化土地改良材料 > 综合性沙化土地改良材料。可见,综合性沙化土地改良材料和高碳性沙化土地改良材料是对沙化土壤很好的改良材料。

(4) 在施加单一的沙化土地改良材料时,需要特别关注土壤埋深与混合比例,对于不同程度的沙漠地区改良与植被修复具有重要的意义。综合性沙化土地改良材料在 -4 ~ -8 cm 土层深度最适宜的添加比例为 9%,在该比例下对降低沙化土壤的导热率效果较佳。

[参 考 文 献]

- [1] 张顺谦,郭海燕,罗勇.气候变化和载畜量对若尔盖草地沙化的驱动力评价[J].*中国草地学报*,2007,29(5):64-71.
- [2] 高志球,姜冬梅.土壤热传导方程解析解和那曲地区土壤热扩散率研究[J].*气象学报*,2002,60(3):352-360.
- [3] Wierenga P J, Nielsen D R, Hagan R M. Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(3): 354-360.
- [4] 李毅,邵明安,王文焰,等.质地对土壤热性质的影响研究[J].*农业工程学报*,2003,19(4):62-65.
- [5] Chen Yongping, Shi Mingheng, Li Xiaochuan. Experimental investigation on heat, moisture and salt transfer in soil[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, 33(9): 1122-1129.
- [6] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomena[M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] 秦耀东.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [8] 吴竟仑,李永丰,张志勇,等.土层深度对稻田杂草种子出苗及生长的影响[J].*江苏农业学报*,2003,19(3):170-173.