

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



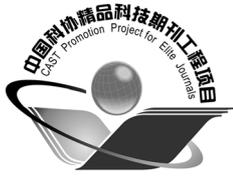
中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

目次

综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 宋长青 谭文峰 (957)
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 李硕 汪善勤 史舟 (1014)
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 赵丹 李毅 冯浩 (1058)
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)
生物质灰对红壤酸度的改良效果 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 李洋 宋洋 王芳等 (1096)
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)
土壤团聚体 N_2O 释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)
不同 $NaNO_3$ 浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)

DOI: 10.11766/trxb201411190580

砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究*

赵丹¹ 李毅^{1†} 冯浩²

(1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要 砂石覆盖已被证实有提高农作物产量的作用, 为了研究条形砂石覆盖对土壤水分蒸发的影响, 采用精度较高的重力传感器称重测量系统测定水分蒸发动态, 进行了 5 种砂石覆盖度 (0%、25%、50%、75%、100%)、2 个灌水量 (25 mm 和 35 mm) 和 2 种土壤 (砂土和垆土) 的土壤水分蒸发试验。结果表明: 砂石覆盖能够有效地抑制土壤蒸发, 且抑制作用与砂石覆盖度密切相关。蒸发初期砂石覆盖度越大, 日蒸发量越低, 但后期日蒸发量趋于稳定 (0.6 mm)。相同覆盖度下, 垆土累积蒸发量 (E_c) 低于砂土。砂石覆盖度增加后累积蒸发量 E_c 随时间变化过程曲线逐渐降低; 同时总蒸发量 E_t 相应减小, 蒸灌比也依次减少, 蒸发量差 ΔE 增大, 表现为覆盖度为 100% 的 E_t 仅为裸土的 65% 左右; 裸土的 E_t 占灌水量 I 的 50% 左右, 而覆盖度为 100% 的 E_t 占灌水量 I 的 35% 左右。 E_c 与时间的关系符合 Gardner 理论关系, 从而得出 E_c 与时间和覆盖度的两参量函数关系。

关键词 砂石覆盖; 覆盖度; 土壤水蒸发;

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤蒸发是农田水循环的重要一环, 也是造成土壤水量损失、导致干旱的一个重要因素, 从而影响农作物产量。大量研究证明塑膜覆盖、秸秆覆盖和砂石覆盖等地表覆盖方式能够有效地抑制土壤蒸发^[1-6], 这些覆盖措施具有增温保墒、控制盐碱化、减少土壤侵蚀、抑制杂草、减少病虫害、提高作物品质、促进作物生长等作用^[7]。在砂石覆盖的相关研究中, Diaz 等^[8]采用土柱模拟试验研究了不同厚度砾石覆盖对土壤蒸发的影响, 结果表明 10 cm 厚的砾石覆盖的抑制蒸发效果要优于 5 cm 的。Modaihsh 等^[9]也利用土柱模拟试验研究了不同厚度和不同粒径砂石覆盖对蒸发的抑制作用。Xie 等^[10]研究了不同厚度和不同粒径砾石覆盖对蒸发的抑制效果。Poesen 和 van Wesemael^[11]在非常干旱的条件下用砂覆盖地表对土壤水分的影响效果和保持水土的有效性进行了研究和探讨, 并通过对比分析讨论了这项措施对保持水土的有效性。研

究证明砂石覆盖可在土体表面形成一个干土层来阻止土壤毛细管水的上升, 砂石的大孔隙结构明显地阻断土壤毛细管水的上升, 可显著减少土壤水分蒸发^[12-15]。但砂石覆盖本质上与地膜覆盖及秸秆覆盖的机理不同, 目前砂石覆盖的相关研究总体上比塑料膜覆盖和秸秆覆盖的研究少得多, 缺乏砂石覆盖条件下的一系列土壤水分—作物产量及其变化过程的定量关系。由于观测条件的限制, 砂石覆盖相关研究很少涉及土壤水分蒸发动态过程。在有限的砂石覆盖抑蒸效应研究中^[16-20], 大部分研究是用电子秤称重法获得不连续的蒸发量数据, 而多次移动土体必定会对土壤结构产生影响。而本试验通过利用较精确的 MHsensor 称重传感器对土体一对一进行不间断称重, 使得所得蒸发量数据更连续也更精确。在大部分砂石覆盖研究中, 均以砂石覆盖厚度为因子, 受地膜覆盖中全膜覆盖和半膜覆盖的启发以及考虑到在大田上不影响作物出苗, 本试验以

* 国家高技术研究发展“863”计划 (2013AA102904)、西北农林科技大学基本科研业务费专项 (YQ2013006) 与教育部、国家外国专家局“111”计划项目 (B12007) 共同资助

† 通讯作者, E-mail: liyikitty@126.com

作者简介: 赵丹 (1990—), 女, 河北廊坊人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: 18792952759@163.com

收稿日期: 2014-11-19; 收到修改稿日期: 2015-02-15

砂石覆盖度为因子, 研究土壤水分蒸发动态过程。

国内外目前的土壤物质迁移模型如HYDRUS^[21]、作物生长过程模型如DSSAT^[22]、RZWQM^[23]、AquaCrop^[24]等均无法准确模拟砂石覆盖条件下的土壤水分变化过程, 而水分状况对于作物生长有至关重要的作用。为使作物模型将来可在地表砂石覆盖条件下应用, 需要提供一些模型修正的参数, 土壤水分蒸发量就是其中之一。本研究旨在对比砂石覆盖度、灌水量和土壤不同条件下的土壤水分蒸发动态过程; 确定不同砂石覆盖度对土壤的保水效应, 从而给出地表砂石覆盖条件下土壤水分蒸发的定量关系。研究结果可为大田砂石覆盖的蒸发过程模拟提供重要参数。

1 材料与方法

1.1 土样处理

供试土样分为两种, 采自陕西杨凌农田表层0~30 cm 垆土和渭河滩砂土。经自然风干、碾压、去除杂物后垆土和砂土过孔径2 mm的筛。另在渭河滩采集砂石, 过孔径8 mm的筛, 作为土表覆盖材料。垆土和砂土的风干含水率采用烘干法测定, 颗粒组成采用颗粒分析仪测定, 土壤质地命名采用国际制方法, 田间持水量采用威尔科克斯法测定, 饱和导水率采用定水头法测定, 供试土样的基本物理性质见表1。

表1 土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical property of the soil samples

土壤	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.02 mm)	砂粒 (0.02 ~ 2 mm)	质地	风干含水率 Air-dried moisture ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	田间持水量 Field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (cm min^{-1})
Soil	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Soil texture			
砂土 Sand	4.79	11.72	83.49	壤质粗砂 Loamy sand	0.01	0.21	0.040
垆土 Lou soil	19.60	41.05	39.35	壤土 Loam	0.05	0.30	0.003

1.2 试验系统与观测过程

试验在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院进行。试验系统包括土箱、加热系统以及称重系统。试验土箱由10 mm厚的透明有机玻璃制成, 土箱规格为30 cm × 30 cm × 30 cm, 箱底均匀分布有直径为5 mm的孔, 箱底垫有滤纸以防土壤漏出。加热设施为275W远红外灯。称重系统由6个MHsensor称重传感器(精度为±0.02%, 量程为150 kg)、6个秤盘支座、CR1000数据采集器及扩展板组成, 用于记录土箱重量的动态变化。

将风干土样按照设定容重(垆土 1.28 g cm^{-3} 、砂土 1.57 g cm^{-3})分层装入土箱, 装土过程中将层间打毛, 装土深度为25 cm, 装土后自然沉降24 h。对土体进行砂石条形覆盖, 地表覆盖的砂石为光滑的椭圆形硬质鹅卵石, 容重为 1.80 g cm^{-3} , 粒径范围为2~8 mm, 砂石覆盖度为覆盖总面积与土体横截面积之比, 覆盖度分别为0%(裸土)、25%、

50%、75%、100%(全覆盖), 覆盖的厚度均为1 cm。其中覆盖度为25%、50%、75%和100%对应的砂石覆盖量分别为1.125、2.25、3.375和4.5 kg m^{-2} , 其中25%、50%及75%的覆盖度处理中将4条等宽的砂石均匀覆于土壤表面。由于此试验为机理试验, 土箱内土壤均匀过筛且容重均一, 各覆盖度下的土壤结构较一致, 因此未设重复。

为防止灌水后水分再分布导致土壤水分渗漏损失, 最终灌溉水量设置为25 mm和35 mm。待入渗结束后, 放置24 h进行水分再分布(其间为防止蒸发用保鲜膜覆盖), 然后在275W远红外灯模拟 $E_0=4 \text{ mm d}^{-1}$ 的大气蒸发能力条件下进行蒸发试验, 同时用30 cm × 30 cm × 20 cm的有机玻璃水箱测定水面蒸发能力, 所有土箱和水箱与灯的距离均固定为60 cm。灯照时间为每日的8:00至18:00, 蒸发10 d后结束试验, 立即沿垂向剖面取土, 采用烘干法测得土样含水率。试验系统见图1。

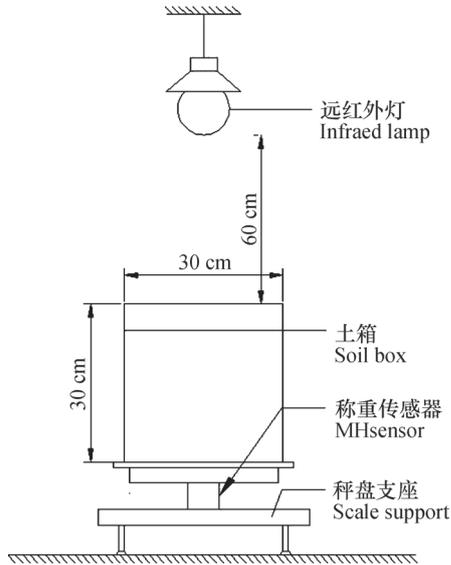


图1 土壤水分蒸发试验系统

Fig.1 Experimental system for soil water evaporation

1.3 理论分析

砂石覆盖条件下的蒸发量与裸土蒸发量的对比需引入一些指标来表达。将总蒸发量记为 E_t ，不同覆盖度下的总蒸发量与裸土蒸发量差表示为 ΔE ，则：

$$\Delta E = E_0 - E_c \quad (1)$$

由于灌水量 I 的值限制蒸发量，因此引入参量蒸灌比表征蒸发量占灌水量的比例，记为 R_{IC} ，则：

$$R_{IC} = E_c / I \quad (2)$$

此外，将有覆盖条件下的 E_t 与裸土 E_t 的比值称为相对蒸发量，表示为 R_C ，则：

$$R_C = E_c / E_0 \quad (3)$$

上述三个指标都从不同角度反映了砂石覆盖后的 E_t 与不覆盖条件下 E_t 的差异，从而定量反应砂石覆盖对蒸发的效应。

在累积蒸发量与时间关系方面，Gardner的研究表明^[25]，累积蒸发量与时间的平方根呈线性关系：

$$E_c = \lambda t^{0.5} \quad (4)$$

式中， E_c 为累积蒸发量，mm； λ 为与土壤水力属性有关的参数； t 为蒸发时间，min。

2 结果

2.1 砂石覆盖度对土壤水分日蒸发量的影响

图2显示了不同砂石覆盖度下垆土及砂土2种土壤在灌水量 I 不同条件下的日蒸发量随蒸发时间的变化，图例表示砂石覆盖度 C 。

从图2可以看出：（1）土壤质地影响日蒸发量，整个蒸发过程中，垆土日蒸发量的变化较砂土的大，砂土只在蒸发中期出现日蒸发量明显减小状态，而在前期和后期均相对平稳，且在灌水量为35 mm的后期，砂土的日蒸发量随覆盖度的增加而增加，主要是因为砂土的保水性差；（2）对于同一土壤、在不同灌水量条件下，日蒸发量随时间递减的趋势大体一致，但低灌水量25 mm下日蒸发量的数值较高灌水量35 mm的小，显然这是由于土体蓄水量有差异造成的。在蒸发开始，在灌水量为35 mm条件下砂石覆盖度为0%的土壤含水量在田间持水量附近，大气蒸发能力决定土壤蒸发力，土壤水分借助毛管力作用上升至土壤表层而产生的失水过程，土壤日蒸发量接近大气蒸发能力；（3）砂石覆盖度由0%增至100%时，日蒸发量一时间曲线整体降低，表现出砂石覆盖度与水分蒸发量之间的有规律递减特征，而且这一规律对于2种土壤和2个灌水量都适用。在蒸发前6 d日蒸发量随砂石覆盖度增大而逐渐减小，尤其第1天各覆盖度下的日蒸发量差异较大，如垆土灌水量为25 mm时，随砂石覆盖度增大，日蒸发量相应为2.55、2.44、2.30、2.12及1.54 mm。第7天之后各处理的日蒸发量减小趋缓，产生这种现象的原因是随着蒸发时间的延长，土体可供蒸发的水量减少。在试验中可观察到各处理土表出现干层，覆盖度越小干层越明显，导致蒸发后期土壤水逐渐转变成以水汽扩散的方式进行蒸发。

由于第8天起日蒸发量均变化不大，趋于稳定，将后三天的蒸发量取均值，作为稳定蒸发量，并取单位时间趋于稳定的日蒸发量为稳定蒸发速率，记为 e_w 。将不同覆盖度处理下的初始蒸发速率 e_i 及稳定蒸发速率 e_w 值详列于表2。

由表2可知：（1）初始蒸发速率 e_i 变化范围1.38 ~ 3.79 mm d⁻¹。同条件下高灌水量的 e_i 值大于低灌水量，垆土的 e_i 值大于砂土的。当覆盖度逐渐增加， e_i 值依次减小，其减幅对于不同土壤的差异不大，但高灌水量的减幅明显大于低灌水量；（2）稳定蒸发速率 e_w 均明显小于 e_i ，主要因为蒸发后期土壤含水量较低，导致蒸发速率低。对同一土壤，当覆盖度不变时，高灌水量的 e_w 更大。如灌水量 I 分别为25 mm和35 mm时，各覆盖度下垆土 e_w 变化范围相应为0.58 ~ 0.60 mm d⁻¹和0.57 ~ 0.72

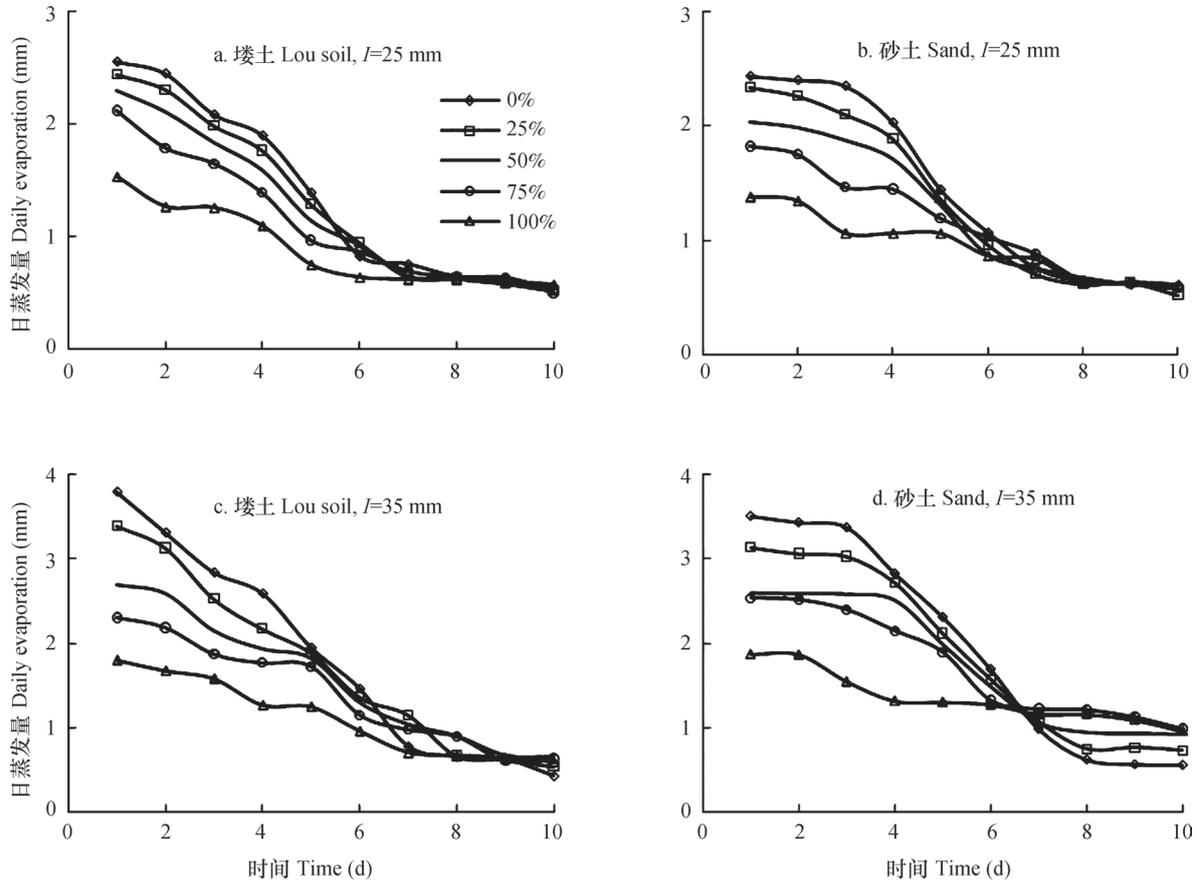


图2 不同砂石覆盖度处理对日蒸发量的影响

Fig.2 Effect of sand-gravel mulch on daily evaporation relative to mulching degree

表2 不同砂石覆盖度下初始及稳定蒸发速率

Table 2 Initial and steady evaporation rate relative to mulching degree

指标 Index	土壤 Soil	I (mm)	覆盖度 Mulching degree (%)				
			0	25	50	75	100
e_i (mm d ⁻¹)	矮土 Lou soil	25	2.55	2.44	2.30	2.12	1.54
	砂土 Sand	25	2.44	2.34	2.03	1.83	1.38
	矮土 Lou soil	35	3.79	3.39	2.69	2.31	1.80
	砂土 Sand	35	3.51	3.14	2.60	2.54	1.87
e_w (mm d ⁻¹)	矮土 Lou soil	25	0.60	0.58	0.59	0.59	0.60
	砂土 Sand	25	0.61	0.59	0.62	0.62	0.63
	矮土 Lou soil	35	0.57	0.61	0.74	0.72	0.64
	砂土 Sand	35	0.58	0.75	0.94	1.11	1.07

mm d⁻¹, 而砂土的 e_w 变化范围相应为0.59 ~ 0.63 mm d⁻¹和0.58 ~ 1.11 mm d⁻¹。因此在低灌水量下各覆盖度的 e_w 可取其中值, 矮土为0.59 mm d⁻¹而砂土为0.61 mm d⁻¹, 灌水量增至35 mm时矮土的 e_w 仍可取各盖度下的中值0.65 mm d⁻¹, 因为该值

与初始蒸发量相比仍小的多。但砂土灌水量为35 mm时不同盖度下的 e_w 变化范围较大取其中值不再合理。

2.2 不同砂石覆盖度对土壤水分累积蒸发量的影响
根据日蒸发量可估算累积蒸发量。图3为不同

砂石覆盖度下累积蒸发量 E_c 与时间 t 的关系, I 为灌水量, 图例表示砂石覆盖度 C 。由图3知: (1) 在相同覆盖度、相同灌水量条件下, 同一时间段内, 砂土的累积蒸发量 E_c 均高于垆土; (2) 对于垆土, 当覆盖度不变时, 高灌水量对应更大的 E_c 。

砂石覆盖度下累积蒸发量 E_c 与时间 t 的关系, I 为灌水量, 图例表示砂石覆盖度 C 。由图3知: (1) 在相同覆盖度、相同灌水量条件下, 同一时间段内, 砂土的累积蒸发量 E_c 均高于垆土; (2) 对于垆土, 当覆盖度不变时, 高灌水量对应更大的 E_c 。砂石覆盖度下累积蒸发量 E_c 与时间 t 的关系, I 为灌水量, 图例表示砂石覆盖度 C 。由图3知: (3) 对于同一土壤, 随砂石覆盖度的增加, $E_c \sim t$ 逐渐减小, 表明砂石覆盖度越大, 对减少 E_c 的作用越明显, 反映了砂石覆盖对土壤蒸发的影响。

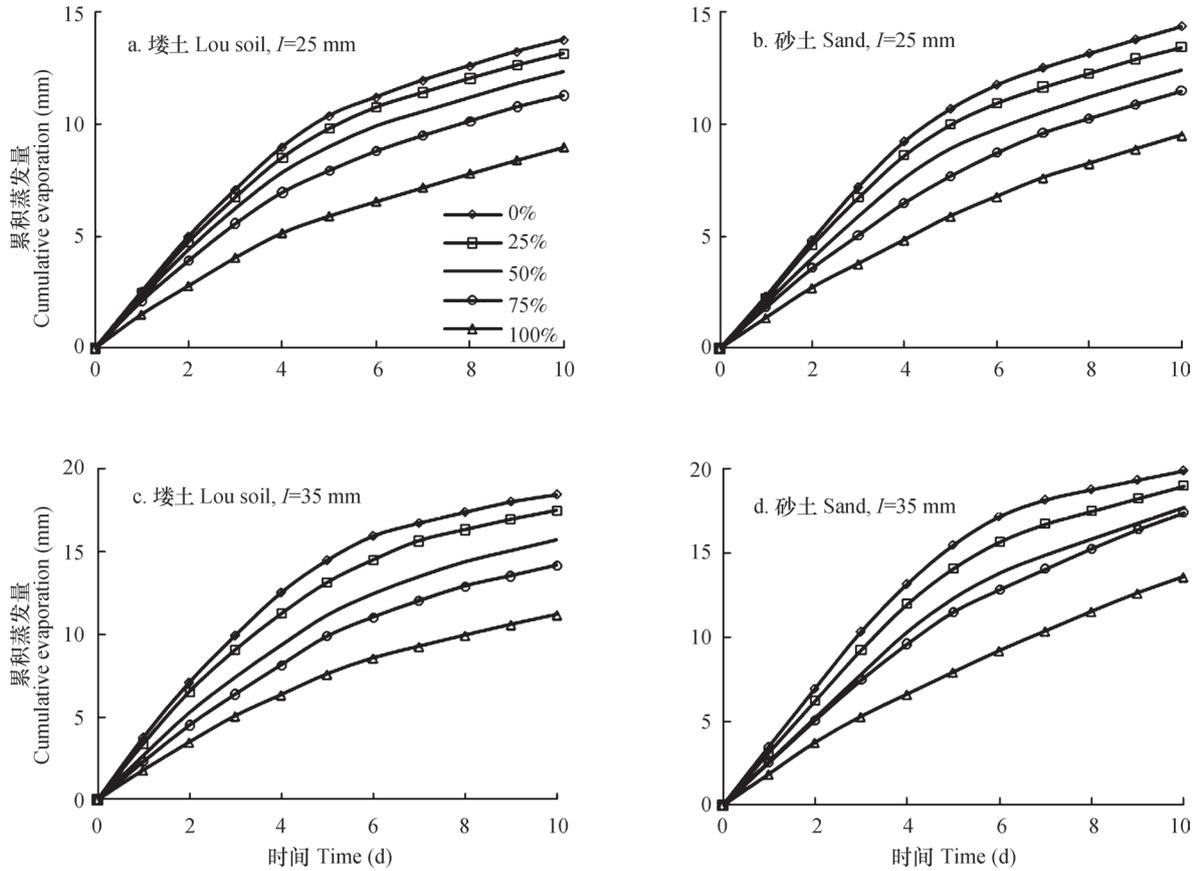


图3 不同砂石覆盖度下累积蒸发量与时间的关系

Fig.3 Relationship between cumulative evaporation and time relative to mulching degree

2.3 砂石覆盖对土壤总蒸发量及相对蒸发量的影响
为进一步对比不同覆盖度下的蒸发特征与裸土

蒸发特征的差异, 统计了不同砂石覆盖条件下的总蒸发量 E_t 和蒸灌比 R_{IC} , 将其值列于表3。

表3 不同砂石覆盖度下的总蒸发量

Table 3 Total soil evaporation relative to mulching degree

指标 Index	土壤 Soil	I (mm)	覆盖度 Mulching degree (%)				
			0	25	50	75	100
E_t (mm)	垆土 Lou soil	25	13.77	13.14	12.31	11.27	8.98
	砂土 Sand	25	14.35	13.42	12.40	11.48	9.51
	垆土 Lou soil	35	18.45	17.47	15.74	14.15	11.18
	砂土 Sand	35	19.88	18.98	17.68	17.39	13.58
R_{IC}	垆土 Lou soil	25	0.55	0.53	0.49	0.45	0.36
	砂土 Sand	25	0.57	0.54	0.50	0.46	0.38
	垆土 Lou soil	35	0.53	0.50	0.45	0.40	0.32
	砂土 Sand	35	0.57	0.54	0.51	0.50	0.39

表4 不同砂石覆盖度下的土壤蒸发量差和相对蒸发量

Table 4 D-value evaporation and relative evaporation relative to mulching degree

指标 Index	土壤 Soil	I (mm)	覆盖度Mulching degree (%)			
			25	50	75	100
ΔE (mm)	矮土Lou soil	25	0.98	2.71	4.30	7.27
	砂土Sand	25	0.90	2.20	2.48	6.30
	矮土Lou soil	35	0.63	1.46	2.50	4.79
	砂土Sand	35	0.93	1.96	2.87	4.85
R_c	矮土Lou soil	25	0.95	0.85	0.77	0.61
	砂土Sand	25	0.95	0.89	0.88	0.68
	矮土Lou soil	35	0.95	0.89	0.82	0.65
	砂土Sand	35	0.94	0.86	0.80	0.66

由表3可知，在相同覆盖度、相同灌水量下，砂土的 E_t 均高于矮土。在不同砂石覆盖度下， E_t 均随砂石覆盖度的增大而减小。在相同砂石覆盖度，同一土壤下，灌水量为35 mm的 E_t 均高于灌水量为25 mm的处理。由各覆盖度下的蒸灌比可知，当其他条件不变时，覆盖度增加则蒸灌比减少。其中裸土的 E_t 大体上占灌水量 I 的50%左右，而砂石覆盖度为100%的 E_t 大体上占灌水量 I 的35%左右，表明灌水量影响着蒸发量，同时砂石覆盖有明显抑蒸效应。

由表4可知：（1）在不同砂石覆盖下，与裸土相比，随着覆盖度 C 的增大，蒸发量差 ΔE 增大，尤其是覆盖度为100%的处理 ΔE 较大， ΔE 分别为

7.27、6.30、4.79和4.85 mm；（2）在不同砂石覆盖下，与裸土相比，随着覆盖度 C 的增大，相对蒸发量 R_c 减小， R_{100} 一般在65%左右，进一步说明了砂石覆盖对土壤水分蒸发的抑蒸效应；（3）整体上矮土的 R_c 小于砂土，说明砂石覆盖对矮土的抑蒸效果较砂土好，主要是因为砂土的保水性差及砂土的颗粒粒径相对矮土更接近砂石粒径，相应的增加了毛管水的上升。

2.4 蒸发量随时间及覆盖度变化的定量关系

本试验中，不同砂石覆盖度下，累积蒸发量 E_c 与时间 t 关系符合式（4）。各处理参数 λ 如表5所示。

拟合参数 λ 与砂石覆盖度 C 的关系见表6。

表5 不同砂石覆盖度下的累积蒸发量拟合参数

Table 5 Fitting parameters of cumulative evaporation relative to mulching degree

土壤 Soil	I (mm)	参数 Parameter	覆盖度Mulching degree (%)				
			0	25	50	75	100
矮土 Lou soil	25	λ	0.116	0.110	0.102	0.092	0.070
		R^2	0.972	0.973	0.974	0.974	0.964
砂土 Sand	25	λ	0.120	0.112	0.101	0.091	0.073
		R^2	0.963	0.965	0.962	0.956	0.939
矮土 Lou soil	35	λ	0.160	0.148	0.129	0.114	0.089
		R^2	0.972	0.974	0.964	0.957	0.959
砂土 Sand	35	λ	0.171	0.158	0.142	0.136	0.101
		R^2	0.960	0.959	0.950	0.949	0.930

表6 λ与C的拟合关系

Table 6 Fitted relationship between λ and C

土壤Soil	I (mm)	λ	R ²
壤土Lou soil	25	$-4 \times 10^{-6}C^2 - 4 \times 10^{-5}C + 0.115$	0.996
砂土Sand	25	$-2 \times 10^{-6}C^2 - 2 \times 10^{-4}C + 0.119$	0.962
壤土Lou soil	35	$-3 \times 10^{-6}C^2 - 4 \times 10^{-4}C + 0.160$	0.996
砂土Sand	35	$-4 \times 10^{-6}C^2 - 3 \times 10^{-4}C + 0.169$	0.962

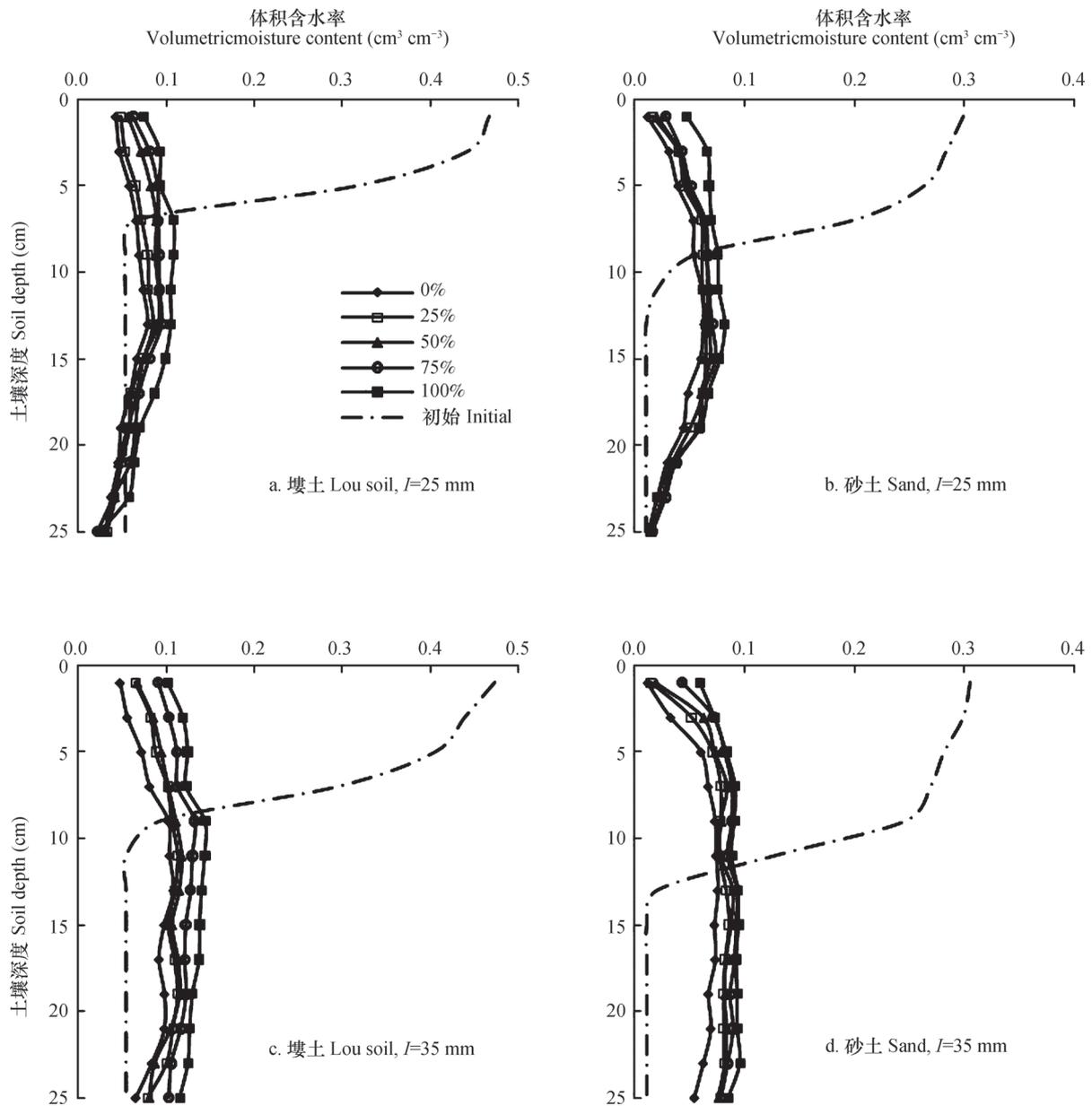


图4 不同砂石覆盖度处理对土壤含水率的影响

Fig.4 Effect of sand-gravel mulch on soil water content relative to mulching degree

由表6可得出: 累积蒸发量 E_c 可统一表示为蒸发时间 t 和砂石覆盖度 C 的两参量函数:

$$E_c = \lambda (C) t^{0.5} \quad (5)$$

当给定砂石覆盖度 C 和灌水量 I , 便可得出累积蒸发量 E_c 随时间 t 的变化关系。

式(5)对时间 t 求导, 可以得到以砂石覆盖度 C 与时间 t 表示的蒸发速率 e :

$$e = \lambda (C) t^{-0.5} \quad (6)$$

同样, 给定砂石覆盖度 C 和灌水量 I , 便可得出蒸发速率 e 随时间 t 的变化关系。

2.5 砂石覆盖度对土壤剖面体积含水率的影响

图4为蒸发结束后不同砂石覆盖度下土壤剖面体积含水率的分布, I 为灌水量, 图例表示砂石覆盖度。

由图4可以看出: (1) 由于质地差异, 同一深度上, 垆土的土壤含水率均高于砂土。(2) 灌水量为25 mm时, 在深度上, 表层0 ~ 6 cm的含水量较低, 6 ~ 15 cm的含水量稍高, 15 ~ 25 cm的含水量递减至灌水前初始值。灌水量为35 mm时, 在深度上, 表层0 ~ 10 cm的含水量较低, 且随深度增加而增加, 10 ~ 25 cm的含水量沿剖面递减, 差异不大, 底部土壤含水量均未达到灌水前初始值。其原因主要是砂石覆盖度越小土表与大气接触面积越大, 土壤表层蒸发越剧烈。土壤表层出现干层现象越严重, 且砂石覆盖度越小, 干层现象越明显, 导致表层土壤含水量越小, 土壤水势差也随之增大。这加快了下层土壤水分向土壤表层转移, 降低了下层土壤含水量。(3) 其他条件不变时, 土壤含水率随着砂石覆盖度的增大而增大, 同样说明砂石覆盖处理能有效地保水和抑制土壤蒸发, 主要原因在于砂石层大孔隙多, 切断了下层土壤毛管作用, 砂石覆盖抑制了表层蒸发, 使蒸发主要在土壤剖面的内部进行, 较好地保持了表层土壤水分, 减缓了下层土壤水分向表层的转移。

3 讨 论

砂石覆盖技术是我国一项拥有300多年历史的农业技术, 但对于砂石覆盖系统的研究还相对缺乏。本研究中的蒸发能力采用杨凌地区多年平均值, 为4 mm d⁻¹。当提高或降低蒸发能力时, 土壤水分蒸发过程也会随之增加或降低, 其变化特征同时受土质、灌水量、土壤入渗能力的影响。此外,

当大气蒸发能力低于土壤供水能力时, 土壤蒸发会相应减慢, 蒸发量将受控于大气蒸发能力, 其数值会接近大气蒸发能力。

本研究在蒸发开始前对应灌水量为25 mm和35 mm对应两种初始土壤含水量的分布。若灌水量低于25 mm或高于35 mm, 则对应的初始含水量分布也会有差别, 平均含水量高于或低于本研究的水分值, 其蒸发量在同时间段上也相应更低或更高, 而不同砂石覆盖度的变化规律在不同灌水量条件下有相似性, 只是数值有一定差异。

本研究分析了不同砂石覆盖度对土壤水分蒸发的抑制效应, 砂石覆盖度越大, 对土壤水分蒸发的抑制效应越明显。在整个室内蒸发模拟过程中, 蒸发过程分为三个阶段, 第一阶段是快速失水阶段, 蒸发速率较快; 第二阶段是蒸发速率下降阶段; 第三阶段是蒸发速率稳定阶段, 此结论与Li^[20]的研究结果一致; 但是在Li的研究中仅涉及了裸土和全覆盖处理。Li^[20]的研究结果表明纯砂和纯石覆盖土壤的水分蒸发量分别是砂石混合覆盖的2.5倍和1.6倍。因此本研究选用的是砂石覆盖, 而非纯砂或纯石覆盖, 也有据可查。本研究除了对比裸土和全覆盖处理之外, 还设置了不同的砂石覆盖度(覆盖量不同), 分别为覆盖度为25%、50%和75%, 以便探讨究竟在不同砂石覆盖度下土壤水分蒸发量是否有差异。本研究结果表明, 砂石覆盖度增加之后蒸发量随之递减, 从而说明覆盖度增加是有一定实际意义的。但就生产实践而言, 大田砂石覆盖度增加意味着播种前铺砂工作量加大和砂石料经济投入的增大, 因此不可无限制增大砂石覆盖量, 其覆盖厚度需要进一步探讨验证。

4 结 论

与裸土相比, 在整个模拟蒸发过程中, 砂石覆盖能够有效抑制土壤蒸发, 这种抑制作用与砂石覆盖度密切相关。砂石覆盖度越大, 日蒸发量越小, 累积蒸发量越小, 覆盖度为100%的效果最为明显。不同砂石覆盖度下的土壤累积蒸发量与时间的关系符合Gardner理论, 用时间与覆盖度两参量均可描述出土壤累积蒸发量和蒸发速率。砂石覆盖还可以有效保持土壤水分, 砂石覆盖度越大, 土壤剖面体积含水率越大, 且5 ~ 15 cm深度的土壤含水量保持平稳状态, 在农业生产上有利于植物根部的

生长发育。与砂土相比, 砂石覆盖处理对垆土的蒸发抑制作用更明显。总体而言, 砂石覆盖能够有效抑制土壤蒸发, 提高土壤含水量, 是可行的保水措施。本文得出的定量结果可为农田砂石覆盖实践提供必要的参考。

参考文献

- [1] 李毅, 任鑫. 覆膜开孔条件下斥水性层状土壤蒸发实验. 农业机械学报, 2012, 43 (11) : 58—64. Li Y, Ren X. Evaporation experiments on layered water-repellent soil under perforated plastic mulch (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43 (11) : 58—64
- [2] 李毅, 任鑫, 司炳成. 覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移. 排灌机械工程学报, 2012, 30 (6) : 738—744. Li Y, Ren X, Si B C. Water and heat movement in layered soils during evaporation under perforated plastic mulch (In Chinese). Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30 (6) : 738—744
- [3] 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 半干旱地区播前灌溉和地膜覆盖对春小麦产量形成的影响. 中国沙漠, 2004, 24 (1) : 77—82. Wang J, Li F M, Jia Y, et al. Effects of plastic film mulching and pre-sowing irrigation on yield formation of spring wheat (In Chinese). Journal of Desert Research, 2004, 24 (1) : 77—82
- [4] 宋凤斌, 戴俊英. 干旱胁迫下秸秆覆盖增强玉米耐旱性的研究. 中国沙漠, 2001, 21 (Z1) 58—62. Song F B, Dai J Y. Effect of straw mulch on drought-tolerance in maize drought stress (In Chinese). Journal of Desert Research, 2001, 21 (Z1) 58—62
- [5] 原翠萍, 张心平, 雷廷武, 等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响. 农业工程学报, 2008, 24 (7) : 25—27. Yuan C P, Zhang X P, Lei T W, et al. Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2008, 24 (7) : 25—27
- [6] 秦百顺, 李斌斌. 不同砾石覆盖保持土壤水分有效性研究. 中国水土保持, 2012 (6) : 46—47, 56. Qin B S, Li B B. Effectiveness of soil moisture keeping under different gravel cover conditions (in Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2012 (6) : 46—47, 56
- [7] 杜延珍. 砂田在干旱地区的水土保持作用. 中国水土保持, 1993 (4) : 36—39. Du Y Z. Effect of sandy field in soil conservation in arid region (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1993 (4) : 36—39
- [8] Diaz F, Jimenez C C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. Agricultural Water Management, 2005, 74: 47—55
- [9] Modaihsh A S, Horton R, Kirkham D. Soil water evaporation suppression by sand mulches. Soil Science, 1985, 139 (4) : 357—361
- [10] Xie Z K, Wang Y J, Jiang W L, et al. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China. Agricultural Water Management, 2005, 81: 173—184
- [11] Poesen J, van Wesemael B. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. Geomorphology, 1997, 18 (3/4) : 183—197
- [12] Kemper W D, Nicks A D, Corey A T. Accumulation of water in soils under sand and gravel mulches. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58: 56—63
- [13] Ma Y J, Li X Y. Water accumulation in soil by gravel and sand mulches: Influence of textural composition and thickness of mulch layers. Journal of Arid Environments, 2011, 75 (5) : 432—437
- [14] Guo G, Araya K, Jia H, et al. Improvement of salt-affected soils, part 1: Interception of capillarity. Biosystems Engineering, 2006, 94 (1) : 139—150
- [15] 纪永福, 蔺海明, 杨自辉, 等. 夏季覆盖盐碱地面对土壤盐分和水分的影 响. 干旱区研究, 2007, 24 (3) : 375—381. Ji Y F, Lin H M, Yang Z H, et al. Study on the effects of covering land on salt and moisture contents in saline or alkaline soil in summer (In Chinese). Arid Zone Research, 2007, 24 (3) : 375—381
- [16] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响. 土壤学报, 2012, 49 (2) : 282—288. Song R Q, Chu R X, Zhang R X, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation and salt distribution (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (2) : 282—288
- [17] 关红杰, 冯浩. 砂石覆盖厚度和粒径对土壤蒸发的影响. 灌溉排水学报, 2009, 28 (4) : 41—44. Guan H J, Feng H. Effects of the thickness and grain size of gravel mulch on soil moisture evaporation (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28 (4) : 41—44
- [18] Tsutomu Y, Mitsuhiro I, Ichiro K. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface. Agricultural Water Management, 2004, 67: 145—155
- [19] 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验. 农业工程学报, 2010, 26 (Z1) : 109—114. Song R Q, Chu G X, Ye J,

- et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26 (Suppl 1) : 109—114
- [20] Li X Y. Gravel - sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. Catena, 2003, 52: 105—127
- [21] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M Th. HYDRUS-2D simulating water flow, heat, and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Calif.: International Ground Water Modeling Center, Riverside, 1999
- [22] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 2003, 18 (3/4) : 235—265
- [23] Ahuja L R, Rojas K W, Hanson J D, et al. Root zone water quality model: Modeling management effects on water quality and crop production. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources, Publications, LLC, 2000
- [24] FAO. Reference manual, introducing AquaCrop. Rome: FAO, 2009
- [25] Gardner H R, Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33: 192—196

DYNAMICS OF SOIL WATER EVAPORATION FROM SOIL MULCHED WITH SAND-GRAVELS IN STRIPE

Zhao Dan¹ Li Yi^{1†} Feng Hao²

(1 College of Water Resources and Architecture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Sand-gravel mulch can effectively inhibit soil water evaporation, and hence promote crop growth. So far fewer researches have been reported on sand-gravel mulching than on plastic film or straw mulching, and little information is available about quantitative relationship between moisture and crop under sand-gravel mulch. To explore effects of sand-gravel mulching on soil water conservation and quantitative relationships between soil water evaporation and sand-gravel mulch, a soil water evaporation experiment, designed to have 5 mulching levels (0%, 25%, 50%, 75% and 100%), two irrigation levels (25 mm and 35 mm) and two soils (sand and loess soil), was carried out. Results show that (1) with the sand-gravel mulching increasing in coverage from 0% to 100%, the daily evaporation—time curve declined; daily evaporation was lower in plots irrigated with 25 mm of water than in the plots irrigated with 35 mm of water; and daily evaporation during the first 6 days decreased gradually with increasing sand-gravel mulching coverage, and after 7 days of evaporation, the decrease in daily evaporation tended to be lower, gradually; (2) the initial evaporation rate (e_i) ranged from 1.38 to 3.97 mm d⁻¹; it stepped down with increasing mulching coverage; e_w (steady evaporation rate) was significantly lower than e_i , varying in the range of 0.57 ~ 1.11 mm d⁻¹ as affected by sand-gravel mulching coverage; (3) with increasing sand-gravel mulching coverage, temporal variation curve of cumulated evaporation (E_c) declined and so did total evaporation (E_t); in the plots of bare soil, E_t accounted for 50% or so of the irrigation water (I), while E_t in the plots under 100% sand-gravel mulching did for about 35% of I only; and with increasing sand-gravel mulching coverage, evaporation to irrigation ratio decreased and evaporation difference (ΔE) increased; (4) The relationship between cumulative evaporation (E_c) and time (t) fitted the theoretical relationship of Gardner, of which the parameter was highly related to mulching degree; thus a two parameter function was obtained for describing the relationships of cumulative evaporation and evaporation rate with mulching degree

and time; and (5) at the end of the evaporation experiment, moisture contents in the soil profiles were much lower than the initial moisture content, regardless of mulching degree; but the moisture contents in the plots under mulch were generally high. To sum up, the effect of mulching on evaporation is apparent. The findings in the experiment may provide some important parameters in simulating soil water evaporation under gravel-sand mulch on a field scale.

Key words Sand-gravel mulch; Mulching degree; Soil water evaporation

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis Song Changqing, Tan Wenfeng (968)
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. (977)

Research Articles

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. (989)
 Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. (1000)
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. (1013)
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou (1022)
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. (1030)
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang (1042)
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. (1056)
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao (1067)
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti (1076)
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. (1086)
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. (1095)
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. (1104)
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. (1114)
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. (1122)
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. (1133)
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. (1142)
 Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. (1151)
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. (1164)

Communications and Comments

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. (1172)

Research Notes

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. (1179)
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. (1186)
 Distribution of Cu (II) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO₃ and its affecting factors Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. (1194)

Cover Picture: Toxicity of deca-brominated diphenyl ether (BDE-209) to *Caenorhabditis elegans* (by Wang Yingli)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

