文章编号:1000-7601(2019)02-0059-05 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.09

雨水导入表土以下不同深度土壤蒸发变化研究

王俊鹏[1],任小龙[1],蔡　铁[1],张　鹏[1],张久成[2]

(1.西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省汉中市农产品质量安全监测检验中心,陕西 汉中 723000)

摘　要:通过蒸发装置模拟试验,将雨水引入到表土层以下不同深度,从而改变土壤接受雨水的深度,测定土壤蒸发量,分析土壤蒸发强度、蒸发量、蒸发率和蒸发量的动态变化,确定改变雨水接受深度对土壤蒸发规律的影响。结果表明:雨水接受深度增加,土壤蒸发强度大幅度减少,雨水接受深度(H)为 30 cm 时,降水量(P)为 30、20、10 mm 处理的第 1 天蒸发强度分别为 1.6、1.3、0.9 mm · d^{-1},仅为地表接受雨水处理蒸发强度的 21.02%、15.85%和12.98%。土壤蒸发量与雨水接受深度和降雨量大小有关,随时间的延长,相同接受深度条件下,蒸发量随雨量增大而增大。地面接受雨水的土壤蒸发量与时间呈对数相关($R^2=0.9959$),雨水接受深度为 30 cm 则呈线性相关($R^2=0.9924$)。与地面接受雨水相比,地表以下土层接受雨水可降低土壤蒸发损失,随深度增加,土壤蒸发率降低,P10H0、P10H10、P10H20 和 P10H30 处理 18 d 蒸发率分别为 141.14%、109.03%、49.16%和 24.75%;土壤水分的蒸发率也与降雨量有关,雨水接受深度为 20 cm,降雨量分别为 10、20、30 mm 时,6 d 内土壤水分蒸发率分别为 26.76%、13.57%和 9.71%%。

关键词:土壤水分;雨水接受深度;蒸发变化规律

中图分类号:S152.7　　**文献标志码**:A

Study of soil evaporation influenced by introducing different depths of rainwater

WANG Jun-peng[1], REN Xiao-long[1], CAI Tie[1], ZHANG Peng[1], ZHANG Jiu-cheng[2]

(1.*College of Agronomy*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;

2. *Hanzhong Agricultural Product Quality and Safety Monitoring and Inspection Center*, *Hanzhong*, *Shaanxi* 723000, *China*)

Abstract: Through a simulation test with an evaporator, the rainwater was introduced into different depths below the surface to study the evaporation of soil moisture. The dynamic changes of soil water evaporation intensity, evaporation rate and evaporation were investigated to determine the impact of rainwater being introduced into various depths below surface on the soil water evaporation.The results showed that the increase in depth of introducing rainwater in to soil greatly reduced the evaporation capacity of soil water. When the depth of introduced rainwater (H) was at 30 cm,the evaporation capacities were 1.6, 1.3 mm · d^{-1} and 0.9 mm · d^{-1} with precipitations (P) at 30, 20 mm and 10 mm,respectively, which corresponded to 21.02%, 15.85% and 12.98% of the evaporation capacity when the rainwater was received on the surface. The total evaporation of soil moisture was related to the depth and precipitation that the rainwater was received. With the increase of time and the depth under the same conditions, the evaporation increased with the increase in rainfall. When the ground received rain, soil water evaporation was logarithmically correlated with time ($R^2=0.9959$); When the depth of introducing rainwater at 30 cm, the soil water evaporation was linearly correlated with time ($R^2=0.9924$).The P10H0, P10H10, P10H20 and P10H30 treatments had evaporation rates of 141.14%, 109.03%, 49.16% and 24.75% in day 18, respectively,which indicated that the depth played an important role in reducing the evaporation. Evaporation rate was also related to precipitation that the increase inprecipitation reduced evaporation rate, when the rainwater accepted depth was 20 cm and the precipitation was 10, 20 mm and 30 mm, the evaporation rate in 6 days were 26.76%,13.57% and 9.71%, respectively.

Keywords: soil moisture; rainwater receiving depth; evaporation variation

收稿日期:2018-04-20　　**修回日期**:2019-03-03

基金项目:陕西省农业创新与攻关“人工改变雨水承接空间位置的果园土壤水分布特征变化研究”(2015NY115)

作者简介:王俊鹏(1962-),男,陕西周至人,副教授,主要从事旱区农艺节水研究。E-mail:wjp369@ nwsuaf.edu.cn

黄土高原雨养农业区土壤水分主要来自于大气降水,通过集雨、蓄水、覆盖等途径提高有限的降水利用效率,这是旱作农业发展的基本途径[1-4]。沟垄集雨系统、覆盖等措施能改善土壤墒情和延长水分有效期,促进农作物和森林植物的生长,对于缺乏灌溉和灌溉成本高的干旱半干旱区非常适用[3-5]。地表为降雨的承接面,雨水被表层土壤所接受,地表土壤水分含量高;土壤水分蒸发依照大气控制阶段,土壤导水率控制阶段和扩散控制阶段进行。邓洋[6]研究表明,初始含水量达到田间持水量的土壤,其蒸发过程与初始饱和的土体蒸发过程一致,当土表形成干层土,其蒸发过程仅由蒸发消滞阶段组成。在低含水率条件下土壤蒸发强度随干层厚度增加而减少。土壤初始含水率较小时,土体干土层厚度是影响蒸发强度的主要因素。Wilson 等[7-9]研究认为,土壤含水率是影响土壤蒸发和运动的重要因素。因此,在田间土壤水分管理过程中,降低表土含水量,将有助于抑制土壤蒸发。在自然降雨条件下,要使表层土壤处于干燥状态无法实现,但通过人工聚集、导入等干预措施,使深层土壤成为雨水接受主体,可以达到既接受雨水,又能实现表层土壤干燥的目的,这类研究少见文献报导。本研究通过模拟试验,将降雨聚集导入地表以下,且为不均匀分布,使表层土壤处于低含水量状态,通过测定不同降雨量、不同土层接受雨水的土壤蒸发量,分析改变雨水接受深度对土壤蒸发规律的影响,为构成“降雨-深层土壤-植物-大气”的水循环体系,更好地利用降雨资源寻求理论依据。

1 试验方法

本试验于 2014 年 6-9 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院遮雨棚内进行。夏季试验 6 月 25 日开始,测定 15 d,秋季试验 9 月 26 日开始,测定 18 d。试验采用模拟降雨量方法进行测定。试验设 12 个处理(表 1),重复 3 次。蒸发装置为内径 19.5 cm、高 50 cm、底部密封的塑料筒(图 1)。蒸发装置于 2013 年 10 月装入过筛表层土,压实后加水至饱和状态,置于露天自然沉降,试验时调整土壤表面低于筒边 1 cm。试验土壤类型为黑垆土,土壤容重 1.25~1.27 g·cm^{-3}。装土时在蒸发装置中间置入长度分别为 10、20 cm 和 30 cm,内径为 1.2 cm 的塑料管,塑料管顶部与土壤表面高度相同,用于导入雨水和确定雨水在土壤中的接受深度。模拟 10、20 mm 和 30 mm 降雨量,根据塑料筒的横截面积折算的水量分别为 298、597 g 和 895 g。接受深度为 H0 的处理水用洗瓶均匀洒于土壤表面,其余处理水通过塑料管和漏斗逐渐加入。试验前称量蒸发装置重量,测得土壤含水量为 12.3%。试验前 7 d 测定间隔为 1 d,7 d 后测定间隔为 2 d。

表 1 试验各处理水平及代码

Table 1 Treatments and code

降雨量 P/mm Precipitation	雨水接受深度 H/cm Rainwater receiving depth			
	0	10	20	30
10	P10H0	P10H10	P10H20	P10H30
20	P20H0	P20H10	P20H20	P20H30
30	P30H0	P30H10	P30H20	P30H30

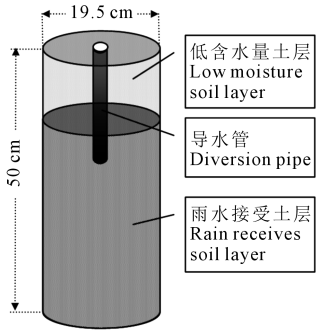

图 1 试验蒸发装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the evaporator

试验数据采用 Excel 统计分析。

蒸发率=蒸发量(kg)/降雨量重量(kg)×100%。

2 结果分析

2.1 雨水接受深度对土壤蒸发强度的影响

在雨水接受深度相同的条件下,土壤蒸发强度随雨量增加而增大,特别是测定前 4 d 变化明显(图 2)。当雨水接受位置在地表(H0)时,夏季试验的第 1 天蒸发强度大,10、20 mm 和 30 mm 降雨量处理蒸发强度分别为 6.7、8.0 mm·d^{-1}和 8.4 mm·d^{-1},蒸发量分别占降雨量的 65.8%、41.2%和 26.3%;第 2 天的蒸发强度大幅下降,仍是降雨量大的处理蒸发强度大;随测定时间延长,蒸发强度减小。其原因在于环境温度高,第 1 天地表水分未及时入渗于土壤深处,表面土壤水分处于饱和状态,蒸发强度由大气环境因素控制;第 2 天以后,水分下渗及地表水分减少(表面土壤处于干燥状态)而使水分蒸发急骤减少,后期维持了相对较小的蒸发强度。秋季试验的 1~3 d 蒸发量大(表 2),较大蒸发强度持续时间较夏季多 2 d;第 4 天后蒸发强度缓慢下降,第 7 天后趋于平稳,但蒸发强度仍为 30 mm 雨量的处理大,10 mm 雨量的处理最小。其原因在于此时大气温度较夏季低,蒸发强度较夏季低,土壤表面水分饱和状态维持时间相对较长,大气控制水分蒸发阶段时间则相对延长,导致较大蒸发强度维持时间比

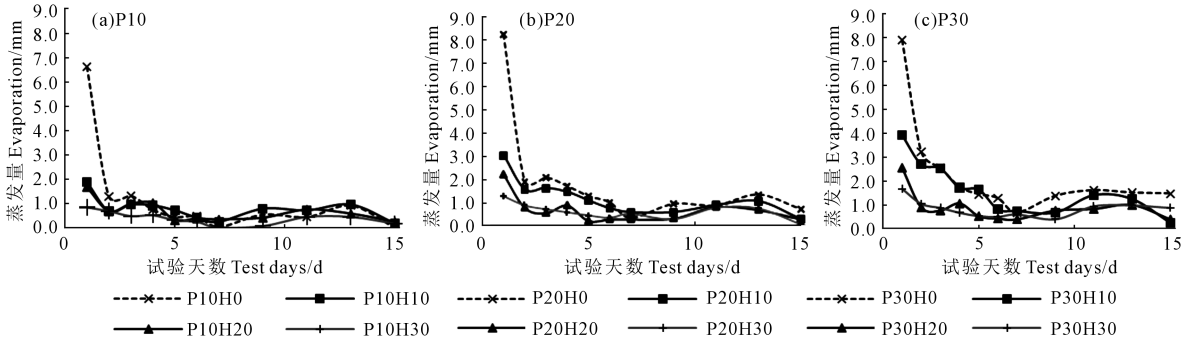

图 2　相同雨量和不同雨水接受深度土壤蒸发量变化图

Fig.2　Change of soil evaporation in different rainwater receiving depths under the same precipitation

表 2　地表接受雨水前 3 d 蒸发量及其占降水量的比例

Table 2　Rainwater evaporation 3 days before the surface receiving water and the proportion to the precipitation

处理 Treatment	蒸发量 Evaporation/mm			占降水量的比例 The proportion of evaporation to precipitation/%			合计 Sum
	第 1 天 Day 1	第 2 天 Day 2	第 3 天 Day 3	第 1 天 Day 1	第 2 天 Day 2	第 3 天 Day 3	
P10H0	3.3	3.2	2.0	32.78	31.77	20.07	84.62
P20H0	3.5	3.4	2.8	17.25	16.92	13.90	48.07
P30H0	3.9	4.0	3.5	13.06	13.28	11.61	37.95

夏季长,随表层土壤含水量降低,蒸发量随之降低。

雨水接受深度为地表下 10 cm(H10)时,不同降雨量情况下,土壤蒸发强度较地表接受雨水处理减少,其动态特征有较大变化。在夏季,该处理的水分蒸发特征与地面接受雨水处理第 2 天以后水分蒸发特征相近,初期蒸发强度随降雨量增加而增大。如第 1 天 30、20 mm 和 10 mm 降水量处理蒸发强度分别为3.9、3.1 mm · d^{-1} 和 1.9 mm · d^{-1},为同期地表接受蒸发强度的 49.47%、36.99%和 28.75%,其蒸发强度较地面接受雨水较小的原因在于表层土壤水分含量较低,土壤蒸发需经土壤扩散到达地面,抑制了土壤水分的蒸发;在秋季,该接受深度处理的水分蒸发特征曲线与夏季不同,降雨量为 20 mm 和 30 mm 的处理差异较大,蒸发强度第 1 天较小,第 2 天最大,之后下降,到第 5 天与同期地面接受雨水的处理接近,而蒸发强度始终小于同期地面接受雨水的处理,其原因在于较多的水分从雨水导入层向上部土壤中扩散,扩散速度大于蒸发速度,使地表土壤含水量增加,水分蒸发强度增大。

在接受雨水深度为地表下 20 cm(H20)和 30 cm(H30)时,初期蒸发强度较地表和 10 cm 接受雨水的处理小,随时间延长,蒸发强度的变化也小。在夏季,雨水接受深度 20 cm 处理第 1 天时,30、20、10 mm 降水量处理蒸发量分别为 2.6、2.2、1.7 mm · d^{-1},为同期地表接受蒸发强度的32.48%、27.24%和 25.70%;雨水接受深度 30 cm 处理第 1 天时,30、20、10 mm 降水量处理蒸发强度分别为 1.6、1.3、0.9 mm · d^{-1},仅为同期地表接受处理蒸发强度的 21.02%、15.85%和12.98%。综上,其原因在于雨水入渗土层距离地面较长,即使水分以液态形式从入渗土层向上扩散,终未能到达土壤表面,只能以汽态形式向上部移动,从而导致不同雨水量处理水分蒸发强度差异较小。结果表明:不同的雨水接受深度可以改变土壤水分初期蒸发强度,随雨水接受深度的增加,土壤水分初期蒸发强度减小,使雨水在土壤中保持的时间不同程度地延长,地表、接受雨水深度为 10 cm 和 20 cm 处理差距明显,接受雨水深度 30 cm 处理与 20 cm 处理差异较小;因此,要全年能够有效减少水分蒸发,雨水接受深度应在 20 cm 以下。

2.2　雨水接受深度对土壤累积蒸发量变化的影响

累积蒸发量可以判断各处理对土壤蒸发抑制的效果。从图 3 可以看出,累积蒸发量 P30H0 处理最高,达 22.28 mm,P10H30 处理最小,为 1.58 mm,各处理累积蒸发量大小依次为:P30H0 > P20H0 > P30H10 > P10H0 > P20H10 > P10H10 > P30H20 > P20H20 > P10H20 > P30H30 > P20H30 > P10H30;P10H0 曲线在第 4 天后平缓上升,与 P30H10 曲线在第 13 天发生交叉,说明 P30H10 在第 13 天后累积蒸发量大于 P10H0,原因在于 P10H0 随时间延长,土壤中水分含量降低,蒸发强度亦随之降低,从而导致累积蒸发量的差异。结果表明:随测定时间的延长,相同雨水接受深度条件下,累积蒸发量随雨量增加而增大;降雨量相同,累积蒸发量随雨水接受深度增加而减小,表明累积蒸发量不仅与接受

深度有关,且与降雨量大小有关。

通过回归分析,地面和 10 cm 接受雨水处理累积蒸发量(E)-时间(t)关系为对数增长(P30H0:$E = 0.1838\ln(t) + 0.1197$, $R^2 = 0.9959$; P30H10:$E = 0.1334\ln(t) + 0.0581$, $R^2 = 0.9950$),曲线起点(常数项,第 1 天蒸发量)随雨水接受深度增加而大幅减小,相同深度时因雨量增加而增大。时间的变量系数在同深度情况下随雨量增加而增大,因深度增加而减小。20 cm 和 30 cm 接受雨水累积蒸发量-时间关系则呈线性相关(如 P30H20:$E = 0.0112t + 0.018$, $R^2 = 0.9924$),在相同接受深度,直线斜率和截距随雨量增加而增大。根据累积蒸发量与时间的回归方程,各处理蒸发 10 mm 土壤水分所需时间如表 3 所示,与测定结果拟合相近。结果表明:雨水接受深度变化可以改变特定时段土壤蒸发特征曲线,较小的雨水接受深度与地表接受降雨蒸发特征曲线近似,较大的雨水接受深度的土壤蒸发曲线特征与地表接受雨水完全不同,蒸发强度较地表接受雨水大幅度减小;加深接受雨水深度,对小降雨量时土壤蒸发抑制的效果更好。

2.3 雨水接受深度对雨水蒸发率的影响

表 4 结果表明,土壤蒸发率 P10H0 处理最高,P30H30 处理最小,其它处理的蒸发率在以上二者之间,其蒸发率顺序为:P10H0>P10H10>P20H0>P30H0 > P20H10 > P30H10 > P10H20 > P20H20 > P10H30>P30H20>P20H30>P30H30。在降雨量相同时,接受雨水深度增加蒸发率大幅度减小,当降雨量为 10 mm,接收深度分别为 0、10、20 cm 和 30 cm 时,6 d 水分蒸发损失率分别为 100.68%、64.55%、26.76%和9.36%,18 d 水分蒸发损失率分别为 141.14%、109.03%、49.16%和 24.75%。

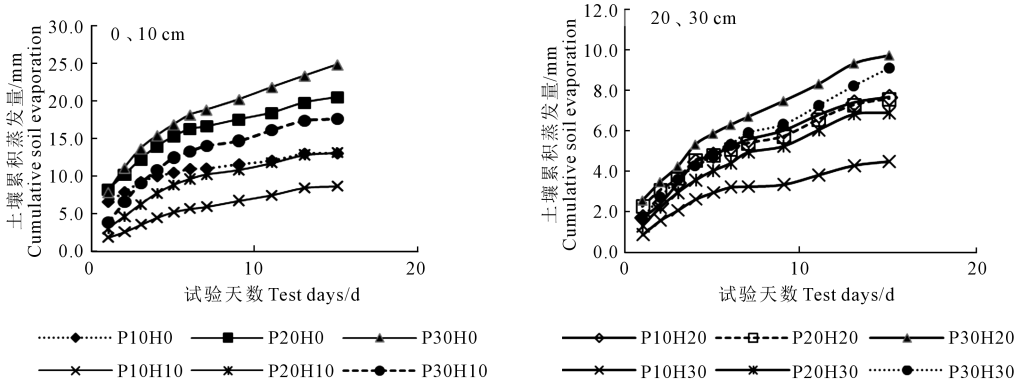

图 3 土壤累积蒸发量动态变化图

Fig. 3 The dynamic change of soil cumulative evaporation

表 3 不同处理下土壤累积蒸发 10 mm 水分所需的天数/d

Table 3 Time required to evaporate 10 mm soil moisture under different treatments

P10H0	P20H0	P30H0	P10H10	P20H10	P30H10	P10H20	P20H20	P30H20	P10H30	P20H30	P30H30
5.8	3.8	2.6	17.3	7.5	6	41	31.2	26.5	77.3	52.8	41.6

在接受雨水深度相同时,随雨量的增大而蒸发率减小,当接受雨水深度为 20 cm,降雨量分别为 10、20、30 mm 时,在 6 d 内水分蒸发率分别为 26.76%,13.57%和 9.71%,18 d 水分蒸发率分别为 49.16%、30.65%和 24.44%。结果表明:在相同环境条件下,与地面接受雨水相比,地表以下土层接受雨水可降低土壤蒸发损失,随深度增加,土壤蒸发率降低,且蒸发率也与降雨量有关,雨量增加,蒸发率则降低;即增加雨水在土壤中的接受深度,或使雨水从均匀分布变为局部集中分布以增加接受深度,能延长雨水在土壤中的滞留时间,提高雨水的转化率。

表 4 不同时段土壤蒸发率变化/%

Table 4 Variation of evaporation rate in different periods

处理 Treatment	时间段 Period/d		
	1	6	18
P10H0	32.78	100.67	141.14
P20H0	17.25	60.97	91.12
P30H0	13.06	49.55	74.11
P10H10	19.06	64.55	109.03
P20H10	8.54	44.56	70.02
P30H10	6.25	32.37	51.23
P10H20	7.36	26.76	49.16
P20H20	3.52	13.57	30.65
P30H20	2.34	9.71	24.44
P10H30	0.33	9.36	24.75
P20H30	0.17	6.03	17.76
P30H30	1.45	5.8	15.4

3　结论与讨论

1)雨水接受深度变化可以改变土壤蒸发强度,随接受深度增加,土壤蒸发强度减小,使雨水在土壤中保持的时间不同程度延长;不同季节土壤蒸发强度存在差异,适宜的抑制蒸发深度在地表 20 cm 以下。

2)不同降雨量相同深度条件下土壤蒸发动态变化特征相近,雨水的接受深度增加可以降低水分的蒸发,地表和地面下 10 cm 蒸发量集中在降雨后 5 d 内,随时间延长,蒸发量趋稳,但仍较深层接受雨水蒸发量大;不同雨水接受深度可以改变雨水蒸发的特征,表现为较小的接受降雨深度与地表接受降雨蒸发近似,只是蒸发量减小,较大的深度其雨水蒸发特征与地表接受雨水完全不同,蒸发量较地表接受雨水大幅度减小。

3)和地表接受雨水相比,随深度增加,雨水蒸发率降低;且蒸发率也与降雨量有关,雨量增加,蒸发率降低,既增加雨水在土壤中的接受深度,又能更好地使雨水保持在土壤中,提高雨水的转化率。

土壤水分蒸散是一个复杂过程,影响因素很多,除气象因素外,土壤含水率是一个重要因素[10]。本研究主要影响因素为降雨量和雨水的接受深度,地面接受 30 mm 雨水蒸发量和钟芳等[11]研究中不覆盖 10 d 蒸发量 32.8 mm 相近;地表下 30 cm 接受雨水的土壤蒸发抑制率为 79.22%~82.46%,高于小麦秸秆覆盖土壤水分株间蒸发抑制率 26.27%~48.32%(土壤水分 44.7~82.5 mm)[12];雷涛等[13]研究表明蓄水坑灌溉条件下,蒸发强度随灌水量增加而增大,且差异显著,因蓄水坑灌地表始终处于干燥状态,对蒸发有抑制作用。本研究采用改变雨水接受深度、降低表层土壤含水量的方法,能有效抑制土壤水分蒸发,其结果与相关研究结论一致。在农作物种植模式下,将接受降雨位置改变为地面以下似乎难以实现,但在果园可通过人工改造果园地为漏斗状集水面,覆盖疏水材料实现雨水聚集,在最低点打孔并置入导水管,可将雨水引入到地面下任意深度,从而改变雨水接受的深度。本研究结论是模拟条件下短期测定的结果,能否在生产上达到预期效果,有待田间试验研究验证。

参 考 文 献:

[1] 姚建民,段海善.降水资源有效化与旱地农业[J]. 资源科学,1999,24(4):47-50.

[2] Boers T M, De Graaf M, Feddes R A, et al. Alinear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones[J]. Agricultural Water Management, 1986,11(3):187-206.

[3] Sharma K D, Pareek O P, Singh H P. Effect of runoff concentration on growth and yield of Jojoba [J]. Agricultural Water Management, 1982,5(1):73-84.

[4] Gupta G N, Limba N K, Mutha S. Growth of prosopis cineraria on microcatchment in an arid region[J]. Annals of Arid Zone, 1999, 38(1):37-44.

[5] 王昕, 贾志宽,韩清芳,等.半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保蓄及作物水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):196-202.

[6] 邓洋.地下浸润灌溉条件下土壤蒸发试验研究[J].绿色科技,2016,(5):45-47.

[7] Wilson G W,Fredlund D G, Barbour S L.The effect of soil suction one vaporative fluxes from soil surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 35(4):692-694.

[8] Yang M,Yanful E K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions[J]. Advances in Environmental Research, 2002,6(4):505-521.

[9] 张书函,雷廷武, 丁跃元,等. 微孔管渗灌时土壤水分运动的有限元模拟及其应用[J].农业工程学报,2002,18(4):1-5.

[10] 林家鼎,孙菽芬.王积强.土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究-土壤表面蒸发阻抗的探讨[J].水利学报,1983,(7):1-8.

[11] 钟芳, 李正平, 宋耀选,等.黄土高原西部土壤蒸发实验研究[J].中国沙漠,2006,26(4):608-644.

[12] 于稀水, 廖允成, 袁泉,等.秸秆覆盖条件下冬小麦棵间蒸发规律研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):58-61.

[13] 雷涛,郭向红,孙西欢,等.蓄水坑灌条件下灌水量对棵间蒸发强度的影响研究[J].节水灌溉,2014,(11):10-16.