

紧实胁迫条件下土壤水分的蒸发及数学模拟

孙 艳^a, 王益权^b, 刘 军^b

(西北农林科技大学 a. 园艺学院, b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探索具有“物理疲劳症”的设施土壤的水分蒸发特性,为设施土壤的水分管理及设施土壤的改良提供依据。**【方法】**在实验室条件下,设置土壤容重分别为 1.2 g/cm³(疏松)和 1.5 g/cm³(紧实)2 个处理,研究紧实胁迫条件下土壤水分蒸发速率随时间的动态变化特征,对蒸发过程进行分段模拟;并根据模拟模型,对各阶段的历经时间进行估算。**【结果】**2 种容重条件下,土壤水分的蒸发过程均具有 3 个明显的阶段性特征:第 1 阶段的蒸发速率高且相对稳定,与大气温度及空气相对湿度有关,蒸发模型用 $\hat{y}=\bar{y}$ (y 为蒸发速率)表示;第 2 阶段的蒸发速率急剧下降,与土壤的导水能力有关,1.2 和 1.5 g/cm³ 土壤容重处理下的平均蒸发速率分别为 1.1, 1.3 mm/d,估算历经时间分别为 25.6 和 28.3 d;第 3 阶段的蒸发速率很小;后 2 个阶段的蒸发模型可用 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ (y 为蒸发速率, t 为时间, a 、 b 为常数)表示。**【结论】**紧实胁迫提高了土壤水分的蒸发速率,使蒸发持续时间延长,水分损失量增大,保墒性降低。

【关键词】 紧实胁迫;土壤容重;水分蒸发;数学模拟

【中图分类号】 S152.5

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)11-0219-05

Soil water evaporation and its maths simulation under compaction stress condition

SUN Yan¹, WANG Yi-quan², LIU Jun²

(a. College of Horticulture, b. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this work was to probe into water evaporation characteristics of horticultural structure soil having physical fatigue, providing a basis for water management in horticultural structure soil and improvement of horticultural structure soil. **【Method】** Under laboratory condition, two treatments of 1.2 g/cm³ (loose soil) and 1.5 g/cm³ (compact soil) soil bulk density were set. Dynamic changing characteristics of soil water evaporation rate with time was studied under compaction stress condition. Water evaporation processes were simulated by sectioned curve. Time for evaporation at each stage was estimated with sectioned model function. **【Result】** There were three clear stages in water evaporation processes of soils having two bulk density treatments. At the first stage, water evaporation rate was great and stable, related to air temperature and relative air moisture, evaporation model is $\hat{y}=\bar{y}$ (y is evaporation rate). At the second stage, water evaporation rate dropped sharply, related to water conductivity of soil. The mean soil evaporation rate of 1.2 and 1.5 g/cm³ bulk density treatment was 1.1 and 1.3 mm/d respectively. At the third stage, water evaporation rate was small. Evaporation model in latter stages was $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ (y is evaporation rate, t is time, a and b are constants). **【Conclusion】** Compaction stress increased the water evaporation rate and water loss amount of soil, prolong evaporation time, and the ability to water retention decreased under compaction stress.

* [收稿日期] 2009-02-27

[基金项目] 陕西省自然科学基金项目(2005C103)

[作者简介] 孙 艳(1964—),女,陕西泾阳人,教授,博士,主要从事蔬菜生理生态研究。E-mail:sunyanma64@sina.com

Key words: compaction stress; soil bulk density; water evaporation; maths simulation

土壤水分蒸发是土壤水分通过土壤表面进入大气,使土壤水分逐渐减少、土壤表层逐渐变干的过程。土壤蒸发是土壤水分平衡极为重要的过程,与作物生产的关系甚为密切。关于土壤水分蒸发的研究较多,研究重点主要集中在:植被条件、覆盖方式及耕作方式对土壤水分蒸发特性的影响^[1-5];环境条件(风速、温度、大气湿度等)对土壤蒸发特性的影响^[6-8];土壤性质如质地、有机质含量、水分含量及盐分含量对水分蒸发特性的影响^[9-12]。而土壤紧实胁迫对水分蒸发的影响尚无报道。土壤紧实是干旱和半干旱地区常见的一种土壤现象,如大型农机具的碾压、土壤干旱等均会导致土壤紧实。土壤紧实也是设施土壤质量下降后的典型直观症状。由于长期连续过量施用化学肥料、长期种植单一作物、人工作业时的频繁踩踏及频繁灌水,设施土壤原有的团粒结构在一定程度上被破坏,土壤的结构性变差,紧实程度和板结程度增加,表现为容重增大、土壤通气孔隙比例降低、通气透水性变差、手触时有僵硬感。土壤科学工作者称这种现象为土壤的“物理疲劳”^[13]。紧实(“物理疲劳”)已成为设施土壤可持续发展的障碍因子之一。本试验以容重为指标,模拟了温室土壤的“物理疲劳”现象,研究了紧实胁迫对土壤水分蒸发特性的影响,以期干旱和半干旱地区土壤及设施土壤的水分管理、土壤改良提供依据,为防止设施土壤的次生盐渍化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验处理

试验于 2006-05-09 在西北农林科技大学资源环境学院进行。土样取自试验地的表土(搂土),经风干过筛后备用。风干土的含水率为 4.02%。试验设置 2 个容重处理,即 1.2 和 1.5 g/cm³,分别用 R1.2 和 R1.5 表示,每处理 3 次重复。当地表层土壤在常态耕作条件下的容重为 1.2 g/cm³,温室土壤连作 4~5 年后的容重约为 1.5 g/cm³(根据不同棚龄土壤容重的实际测定结果计算所得)。因此,用容重为 1.2 g/cm³处理(R1.2)表示疏松土壤,用容重为 1.5 g/cm³处理(R1.5)表示紧实土壤。每处理所需土壤量根据土壤容重、盆钵体积及土壤含水量计算而得。盆子大小(内径×内高)为 12 cm×12 cm。盆子装好后,于 05-22 以土壤田间持水量 26%(质量含水量)浇水;之后用保鲜膜密封盆口,平衡 3 d,让水

分充分渗透;然后弃膜并置盆于环境因子变化较为稳定的实验室未封闭玻璃罩内,每天称质量,根据每日的失水量计算水分蒸发速率。试验于 05-25 开始,07-30 结束。

1.2 土壤水分蒸发速率的计算

蒸发速率/(mm·d⁻¹)={〔日失水量(g/d)/水的比重(g/cm³)〕/蒸发面积(cm²)}×10。

1.3 土壤水分蒸发过程的数学模拟及历经时间的估算

土壤水分蒸发过程的数学模拟及蒸发各阶段历经时间的估算均用 DPS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 紧实胁迫对土壤水分蒸发速率的影响

温室土壤种植 4~5 年后,表层土壤的容重增大,之后随着种植时间的延长,容重继续增大但增幅减小^[14-15]。容重的增加使得表层土壤变得紧实,导致土壤内的孔隙特征发生变化,保水性能受到影响。紧实土壤和疏松土壤水分蒸发速率的动态变化如图 1 所示。

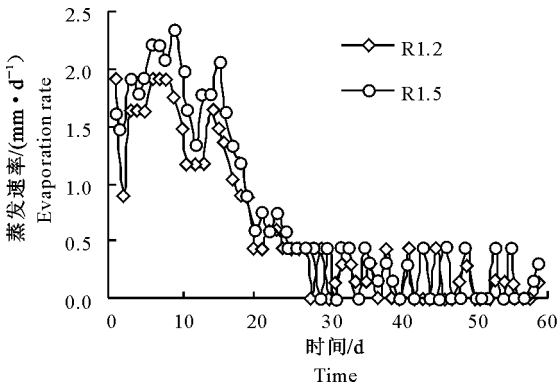


图 1 不同容重土壤水分蒸发速率的动态变化
Fig.1 Trends of water evaporation rate of different bulk density soils

从图 1 可以看出,2 个处理水分蒸发速率的变化趋势基本相同,并且均具有 3 个明显的阶段性特征^[16]。

第 1 阶段:蒸发开始到蒸发的第 14 或 15 天。此阶段内,土壤水分含量很高,蒸发速率也较高,R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别为 1.6,1.9 mm/d,且 R1.5>R1.2。该阶段持续的时间较长,R1.2 为 13 d,R1.5 为 14 d。较高的蒸发速率及较长的蒸发持续时间,使此阶段内土壤水分的损失量

较大,是土壤水分损失的主要阶段。在此阶段内,紧实土壤的水分损失量高于疏松土壤,R1.2 和 R1.5 的累计水分损失量分别为 20.2,26.0 mm。此阶段内土壤水分蒸发速率主要取决于环境温度及空气相对湿度等,而土壤性质则是次要因子。由于环境温度及空气相对湿度的变化,致使 2 个处理的蒸发速率表现出一定的起伏现象。而土壤松紧程度的不同,使得 2 个处理的孔隙数量及孔隙致密程度也表现出了不同,继而使土壤的导水能力出现差异,因此 2 个处理的蒸发速率亦不相同。

第 2 阶段:蒸发的第 14 或 15 天到第 20 天。这一阶段持续时间相对较短,R1.2 持续 7 d,R1.5 持续 6 d;蒸发速率迅速下降,明显低于第 1 阶段,R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别为 1.1,1.3 mm/d,且 $R1.5>R1.2$ 。与第 1 阶段相比,虽然 R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别下降 31.3%,31.6%,但仍保持着较高的水平。因此,此阶段仍是土壤水分损失的重要时期。

从该阶段土壤水分蒸发速率的变化趋势可以看出,蒸发速率迅速下降,没有起伏变化,环境温度及空气相对湿度的变化对蒸发速率的影响较小。由此可知,此阶段水分蒸发速率主要取决于下层土壤水分的传导能力。由于 R1.5 的蒸发速率大于 R1.2,表明紧实胁迫能使土壤水分的传导能力提高。

第 3 阶段:蒸发的第 20 天以后。此阶段内,土壤水分含量更低,2 个处理的蒸发速率也更低,R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别为 0.1,0.2 mm/d,仍是 $R1.5>R1.2$ 。该阶段的蒸发速率较为稳定,变化不大,持续时间比第 1 阶段长。

综合上述分析可知,在土壤水分蒸发的 3 个阶段中,紧实土壤的水分蒸发速率大于疏松土壤,即紧

实胁迫使得土壤水分的蒸发速率增大。这种情况的出现与紧实土壤及疏松土壤的松紧程度(即容重)不同有关。容重是土壤重要的物理性质之一,决定着土壤的孔隙状况,容重越大,大孔隙的数量越少,而小孔隙数量则越多^[17]。这意味着紧实胁迫使土壤中的小孔隙数量增加,毛细管连续性好,水分移动顺畅,蒸发速率提高;反之,容重小的土壤,其中的大孔隙数量多,小孔隙数量少,使得毛细管的连续性断裂,水分移动受阻,因而蒸发速率降低。尤其在蒸发的第 2 阶段,土壤紧实程度成为影响同一类型(质地及性质相同)土壤蒸发速率的关键因素。因为在蒸发的第 2 阶段中,环境因子(环境温度及空气相对湿度)对蒸发速率的影响作用甚微,下层土壤水分传导能力是影响蒸发速率的主导因子,而紧实程度是控制土壤水分传导能力的关键因子。生产实践中常常采用中耕等措施疏松土壤,以减少水分蒸发的损失,其原理就是破坏土壤的水分传导能力。

2.2 紧实胁迫条件下土壤水分蒸发过程的数学模拟

不同研究者对土壤水分蒸发过程模拟时采用的模型不尽相同^[18-20]。本研究采用分段法对紧实胁迫条件下土壤水分的蒸发过程进行模拟。

2.2.1 土壤水分蒸发的第 1 阶段 第 1 阶段内,2 个处理的土壤水分蒸发速率表现出一定的起伏波动,主要与大气温度及空气相对湿度的变化密切相关。对 2 个处理的土壤水分蒸发速率(y)与大气温度(T)及空气相对湿度(M)进行相关分析发现, y 与 T 和 M 之间呈线性关系,即 $y=b_0+b_1T+b_2M$,且回归关系极为显著($n=13,df=11,R_{0.01}=0.684$; $n=14,df=12,R_{0.01}=0.661$)。R1.2 和 R1.5 的回归方程分别为:

$$\begin{aligned}\hat{y}_{R1.2} &= -1.970 + 0.167T - 0.019M, R = 0.744^{**}, R^2 = 0.554; \\ \hat{y}_{R1.5} &= -2.686 + 0.196T - 0.014M, R = 0.837^{**}, R^2 = 0.701.\end{aligned}$$

从回归方程可以看出, y 与 T 之间的回归系数为正值,这表明大气温度和蒸发速率之间呈正相关关系,即大气温度越高,蒸发速率则越大;而 y 与 M 之间的回归系数为负值,表明空气相对湿度和蒸发速率之间呈负相关关系,即大气湿度越高,蒸发速率越小。

对 2 个处理的 y 与 T 和 M 之间进行途径分析发现,在所有途径系数中(表 1),直接途径系数的绝对值大于间接途径系数的绝对值,说明 T 和 M 对 y 的直接作用即 $T \rightarrow y$ 及 $M \rightarrow y$ 是主要的, T 和 M 对

y 的间接作用即 $T \rightarrow M \rightarrow y$ 及 $M \rightarrow T \rightarrow y$ 是次要的。在影响土壤水分蒸发速率(y)的直接作用因子中,对 R1.2(即疏松土壤)而言, $|r_{M \rightarrow y}| > |r_{T \rightarrow y}|$,亦即空气相对湿度(M)对蒸发速率(y)的直接作用大于大气温度(T)。对 R1.5(即紧实土壤)而言, $|r_{T \rightarrow y}| > |r_{M \rightarrow y}|$,亦即温度(T)对蒸发速率(y)的直接作用大于空气相对湿度(M)。由此可见,在土壤水分蒸发的第 1 阶段,对紧实度不同的同一类型土壤而言,土壤紧实程度是导致水分蒸发速率差异的内在因素;而大气温度和空气相对湿度对蒸发速率影响作用的

大小因土壤紧实程度的不同而有差异。

表 1 不同容重土壤水分蒸发速率(y)与大气温度(T)及空气相对湿度(M)之间的通径系数

Table 1 Path coefficients among water evaporation rate(y)of different bulk density soils, air temperature (T) and air relative moisture (M)

处 理 Treatment	通径系数 Path coefficients			
	$r_{T \rightarrow y}$	$r_{M \rightarrow y}$	$r_{T \rightarrow M \rightarrow y}$	$r_{M \rightarrow T \rightarrow y}$
R1.2	0.643	-0.726	-0.301	0.267
R1.5	0.865	-0.638	-0.262	0.356

根据相关分析和通径分析结果及土壤蒸发理论^[21],第1阶段的蒸发速率与大气温度及空气相对湿度有关,此阶段蒸发速率相对稳定。因此,R1.2和R1.5在第1阶段的蒸发模型用此阶段的平均蒸发速率表示,即 $\hat{y}=\bar{y}$,计算可知, $\hat{y}_{R1.2}=1.6$, $\hat{y}_{R1.5}=1.9$ 。

2.2.2 土壤水分蒸发的第 2、3 阶段 用 DPS 软件

表 2 不同容重土壤水分蒸发速率动态变化的模拟分析

Table 2 Model analyses of water evaporation rate trend of different bulk density soils

处 理 Treatment	参 数 Parameters			
	a	b	R^2	R
R1.2	0.047	51.225	0.864	0.929**
R1.5	0.047	56.706	0.859	0.927**

注(Note): $df=60$, $R_{0.05}=0.250$, $R_{0.01}=0.325$ 。

从表2可以看出,在 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 模型中,2个处理的参数 a 相同,而参数 b 则不同,R1.2的 b 小于R1.5,表明参数 b 与土壤的紧实程度(容重)有关。虽然2个处理的参数 b 不同,但其数值水平与2个处理蒸发主要阶段持续的时间相当。故可以认为, b 是影响不同紧实程度土壤蒸发速率的主要参数。因此,用 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 表示不同容重条件下土壤水分蒸发速率(y)与时间(t)之间的关系较为恰当,该模型与实测数据之间的拟合程度很高,回归关系达到极显著水平,R1.2和R1.5的决定系数 R^2 分别为0.864,0.859,相关系数 R 分别为0.929**和0.927**。R1.2和R1.5的模型分别为:

$$\begin{aligned}\hat{y}_{R1.2} &= 0.047e^{\frac{51.225}{t}}, \\ \hat{y}_{R1.5} &= 0.047e^{\frac{56.706}{t}}.\end{aligned}$$

在 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 模型中,当 $t \rightarrow \infty$ 时,则 $\hat{y} \rightarrow a$,即随着蒸发时间的持续延长,蒸发速率趋向于一个很小的固定值 a 。在本试验中,R1.2和R1.5的参数 a 均为0.047,表明不同紧实程度的同类土壤,虽然它们的基础水量不同,但当蒸发时间持续延长时,紧实土壤和疏松土壤的水分蒸发速率逐渐趋于相同。

2.3 紧实胁迫条件下土壤蒸发主要阶段历经时间的估算

2.3.1 土壤水分蒸发的第 1 阶段 土壤水分蒸发

对蒸发的第2阶段和第3阶段进行综合模拟,在决定性系数 $R^2 > 0.8$ 的模型中,根据较高的 R^2 、数学模型的物理意义及土壤蒸发理论知识,选取了 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 模型作为土壤水分蒸发速率(y)与时间(t)之间的数学模型,模拟结果见表2。

第1阶段的结束意味着第2阶段的开始,而第1阶段、第2阶段的数学模型分别为 $\hat{y}=\bar{y}$ 和 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$,在此点蒸发速率是相同的,即 $\bar{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 。则对R1.2和R1.5分别有:

$$\begin{aligned}1.6 &= 0.047e^{\frac{51.225}{t}}, \\ 1.9 &= 0.047e^{\frac{56.706}{t}}.\end{aligned}$$

则: $t_{R1.2}=14.6\text{ d}$, $t_{R1.5}=15.4\text{ d}$,即R1.2和R1.5历经土壤水分蒸发第1阶段的估算时间分别为14.6和15.4 d,R1.5比R1.2历经的时间长0.8 d。

2.3.2 土壤水分蒸发的第 2 阶段 土壤水分蒸发第2阶段和第3阶段建立了同一个数学模型 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$,当该函数的二阶偏导 $y''=0$,即 $t=\frac{b}{2}$ 时,函数出现拐点,此拐点就是土壤水分蒸发第2阶段历经的时间。R1.2和R1.5出现拐点的时间分别为 $t_{R1.2}=25.6\text{ d}$, $t_{R1.5}=28.3\text{ d}$,即R1.2和R1.5历经土壤水分蒸发第2阶段的时间分别为25.6,28.3 d,R1.5比R1.2历经的时间长2.7 d。

根据上述估算结果,土壤水分蒸发第1阶段和第2阶段的持续时间,R1.2分别为14.6和25.6 d,R1.5分别为15.4和28.3 d。第1阶段和第2阶段持续时间合计R1.2为40.2 d,R1.5为43.7 d,表明第1阶段和第2阶段持续的时间因土壤紧实程度的增大(容

重增大)而延长,R1.5 比 R1.2 延长了3.5 d。

由于蒸发的第 1 阶段和第 2 阶段是土壤水分损失的主要时期,因此估算土壤水分蒸发第 1 阶段和第 2 阶段持续时间的长短,是估测水分损失量的重要依据。

3 结 论

紧实胁迫使土壤水分蒸发速率增加。紧实土壤和疏松土壤水分蒸发速率的变化趋势基本相同,并呈现出明显的 3 个阶段。

第 1 阶段的蒸发速率(y)最大,R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别为 1.6,1.9 mm/d,蒸发速率主要受大气温度(T)及空气相对湿度(M)的影响。R1.2 和 R1.5 的蒸发速率模型分别为: $\hat{y}_{R1.2}=1.6$ 和 $\hat{y}_{R1.5}=1.9$,该阶段的估算历经时间分别为 14.6 和 15.4 d。

第 2 阶段的蒸发速率(y)迅速下降,受大气温度(T)和空气相对湿度(M)的影响较小,主要受下层土壤水分传导能力的影响,而土壤紧实程度是影响同一类型土壤水分传导能力的关键因子。R1.2 和 R1.5 的平均蒸发速率分别为 1.1,1.3 mm/d。该阶段的估算历经时间分别为 25.6 和 28.3 d。

第 3 阶段的蒸发速率(y)很小,R1.2 和 R1.5 分别为 0.1,0.2 mm/d,变化也较为稳定。第 2 和第 3 阶段的蒸发速率(y)可用数学模型 $\hat{y}=ae^{\frac{b}{t}}$ 表示,R1.2 和 R1.5 的蒸发速率分别为 $\hat{y}_{R1.2}=0.047e^{\frac{51.225}{t}}$ 和 $\hat{y}_{R1.5}=0.047e^{\frac{56.706}{t}}$ 。

【参考文献】

[1] 熊 伟,王彦辉,程积民,等.不同植被覆盖条件下土壤水分蒸发的比较[J].中国水土保持科学,2005,3(3):65-68.
Xiong W, Wang Y H, Cheng J M, et al. Comparison of soil moisture evaporation under different vegetation coverage condition[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 65-68. (in Chinese)

[2] 门 旗,李 毅,冯广平.地膜覆盖对土壤棵间蒸发影响的研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):17-20,25.
Men Q, Li Y, Feng G P. Effects of plastic film mulch patterns on soil surface evaporation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 17-20, 25. (in Chinese)

[3] 陈四龙,陈素英,孙宏勇,等.耕作方式对冬小麦棵间蒸发及水分利用效率的影响[J].土壤通报,2006,37(4):817-820.
Chen S L, Chen S Y, Sun H Y, et al. Effect of different tillages on soil evaporation and water use efficiency of winter wheat in the field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 817-

820. (in Chinese)

[4] 刘安能,周新国,孟兆江,等.麦棉套作方式下小麦棵间蒸发量研究[J].河南农业大学学报,2006,40(4):375-378,382.
Liu A N, Zhou X G, Meng Z J, et al. Study on soil evaporation of winter wheat intercropping with cotton[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(4): 375-378, 382. (in Chinese)

[5] 孙景生,康绍忠,王景雷,等.沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(11):20-24.
Sun J S, Kang S Z, Wang J L, et al. Experiment on soil evaporation of summer maize under furrow irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 20-24. (in Chinese)

[6] 高鹏程,张国云,孙平阳.土壤水分蒸发与吹风的关系[J].西北林学院学报,2004,19(3):89-91.
Gao P C, Zhang G Y, Sun P Y. Relation between soil evaporation and winding[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3): 89-91. (in Chinese)

[7] 高鹏程,张一平,张国云,等.水热耦合下的水汽蒸发动力学[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):86-91.
Gao P C, Zhang Y P, Zhang G Y, et al. Kinetics of water evaporation with the coupling of water and and temperature[J]. Agricultural Research in the Aried Areas, 2004, 22(4): 86-91. (in Chinese)

[8] 范爱武,刘 伟,王崇琦.环境因子对土壤水分蒸散的影响[J].太阳能学报,2004,25(1):1-5.
Fan A W, Liu W, Wang C Q. Effects of environmental factors on the evapotranspiration of the soil water[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(1): 1-5. (in Chinese)

[9] 来剑斌,王永平,蒋庆华,等.土壤质地对潜水蒸发的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(6):153-157.
Lai J B, Wang Y P, Jiang Q H, et al. Study on phreatic evaporation under different soil textures[J]. Journal of Nowthwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Nature Science Edition, 2003, 31(6): 153-157. (in Chinese)

[10] 董智君,赵 英.黑土有机质含量和土壤水分蒸发关系的研究[J].农业系统科学与综合研究,2000,16(2):145-148.
Dong Z J, Zhao Y. Studies on the relationship between content of organic matter and water evaporation of black soil[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2000, 16(2): 145-148. (in Chinese)

[11] 刘安能,周新国,孟兆江,等.不同土壤水分条件下小麦地蒸散日变化规律的研究[J].节水灌溉,2005(3):1-3.
Liu A N, Zhou X G, Meng Z J, et al. Daily variation of evapotranspiration in wheat field under different soil moisture[J]. Saving Irrigation, 2005(3): 1-3. (in Chinese)

[12] 李新举,张志国,刘勋岭.土壤含盐量对土壤水分蒸发影响的初步研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2000,31(2):209-210.
Li X J, Zhang Z G, Liu X L. Studies on effects of soil salt content on soil water evaporation[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2000, 31(2): 209-210. (in Chinese)