# 有机肥与土壤调理剂施用方式对风沙土水分蒸发的影响

杨 旭[1], 李 鹏[1], 裴艳武[2], 周世璇[1], 黄友奇[1], 赵佳驹[1]

(1.西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室,
陕西 西安 710048; 2.榆林大学 现代农学院, 陕西 榆林 719000)

**摘 要:** [目的]为解决黄土高原风沙土蒸发强烈、保水性差的问题,通过比较有机肥与土壤调理剂不同施用方式对风沙土水分蒸发的抑制效果,筛选出最优的施用模式。[方法]通过室内土柱模拟试验,比较有机肥与土壤调理剂在层施、混施、表施3种方式下对土壤水分蒸发动态的影响。[结果]表施处理抑制水分蒸发效果最好。表施有机肥7 d后累积蒸发量只有自由水面的19.52%,显著优于施用土壤调理剂(41.43%)和裸土(58.39%)。蒸发过程存在阶段性特征,其中有机肥层施在第6 d出现蒸发量瞬间下降30.95%。表施处理在高温时段(12:00—14:00)仍表现出较强的抑制蒸发效果,蒸发量降低23.7%。有机肥在表施处理下的蒸发速率为27.9 g/d,仅为土壤调理剂表施的43.2%,说明了其具有持续的保水能力。[结论]有机肥与土壤调理剂在不同施用方式下可以影响土壤水分蒸发,其中有机肥表施可有效降低水分蒸发强度,为干旱区风沙土的改良与水分管理提供依据。

**关键词:** 有机肥; 土壤调理剂; 土壤水分蒸发; 施用方式

**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0228-07 **中图分类号:** S157

**文献参数:** 杨旭, 李鹏, 裴艳武, 等.有机肥与土壤调理剂施用方式对风沙土水分蒸发的影响[J].水土保持通报,2026,46(4):228-234. Yang Xu, Li Peng, Pei Yanwu, et al. Effects of application methods of organic fertilizer and soil conditioner on water evaporation in aeolian sandy soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):228-234.

**DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.035** **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.035**

# Effects of application methods of organic fertilizer and soil conditioner on water evaporation in aeolian sandy soil

Yang Xu[1], Li Peng[1], Pei Yanwu[2], Zhou Shixuan[1], Huang Youqi[1], Zhao Jiaju[1]

(1.*State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*; 2.*College of Advanced Agricultural Sciences, Yulin University, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*)

**Abstract:** [Objective] The effects of different application methods of organic fertilizer and soil conditioner on suppressing soil water evaporation were compared in order to address the issues of intense evaporation and poor water retention in aeolian sandy soil of the Loess Plateau and to identify the optimal application strategy. [Methods] Indoor soil column simulation experiments were conducted to evaluate the dynamics of soil water evaporation under three application methods: layered application, mixed application, and surface application of organic fertilizer and soil conditioner. [Results] Surface application demonstrated the best effect in inhibiting water evaporation. The cumulative evaporation after 7 days of surface-applied organic fertilizer was only 19.52% of that from the free water surface, significantly better than that with surface-applied soil conditioner (41.43%) and bare soil (58.39%). The evaporation process exhibited phased characteristics, with a sharp decrease of 30.95%

**收稿日期:**2025-11-13 **修回日期:**2026-02-19 **采用日期:**2026-02-23

**资助项目:**国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金重点支持项目"淤地坝关键隐患致溃机理及坝系溃决洪水分析方法、风险防控"(U2443228); 陕西省技术创新引导计划(基金)资助项目(2024QY-SZX-27);陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-10);国家自然科学基金青年项目"风沙区浅层地下水位变化下植物水分利用特征与耗水机制"(42407429);西安理工大学博士创新资助项目(104-252072401)

**第一作者:**杨旭(2001—),男(汉族),陕西省商洛市人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。Email:yangxu6125@163.com。

**通信作者:**李鹏(1974—),男(汉族),山东省烟台市人,博士,教授,主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。Email:lipeng74@163.com。

observed on the 6th day for organic fertilizer under layered application. Surface application maintained strong suppression even during the high-temperature period (12:00—14:00), reducing evaporation by 23.7%. The evaporation rate of the surface-applied organic fertilizer was measured at 27.9 g/d, representing only 43.2% of the rate observed for the surface-applied soil conditioner, demonstrating the superior and sustained water retention capacity of the organic fertilizer. [Conclusion] The application methods of organic fertilizer and soil conditioner significantly affect soil water evaporation. In arid and sandy regions, surface application of organic fertilizer effectively reduces evaporation intensity, offering a basis for soil improvement and water management.

**Keywords: organic fertilizer; soil conditioner; soil water evaporation; application methods**

在全球气候变化和人类活动双重驱动下,黄土高原地区的水资源短缺问题日益严峻。该地区土层深厚但质地疏松、保水能力差[1]。土壤水分蒸发是地表水循环的重要过程,也是造成土壤水分损失的关键驱动因素[2]。在农业生产过程中,蒸发不仅导致土壤水分迅速损失,还降低了有限水资源的利用效率,制约农业发展[3-5]。而在诸多抑制蒸发的措施中,土壤添加剂因其成本较低、操作简便和环境友好等优势而受到广泛关注[6]。合理施用土壤添加剂不仅能够降低土壤容重,改善土壤结构,还能提高土壤持水能力和肥力[7-8]。

土壤调理剂是指一种可以改善土壤物理、化学和生物性状的物料,可以改良土壤结构,改善土壤水分状况等[9]。朱磊等[10]研究发现添加煤矸石的土壤调理剂能有效改善风沙土的物理结构。艾峰等[11]研究发现,施用土壤调理剂能显著通过增加土壤水分含量来改善沙土。杨金翰等[12]研究发现,土壤调理剂在高频灌溉条件下对土壤水分具有一定的固持作用。李丰杰等[13]的试验表明,施用调理剂可以显著提高土壤的田间持水量。随着调理剂用量增加,土壤物理性状也得到改善。崔恒等[14]通过试验发现在黄绵土上,水分的蒸发散失量随着土壤调理剂用量的增加不断降低。有机肥同样在抑制土壤蒸发方面具有显著效果。作为富含有机质和有益微生物的材料[15],有机肥能够提高土壤孔隙度、改善团聚体特性,从而增强水分保持能力[16-17]。赵敏等[18]研究发现,有机肥与保水剂配施可有效改善褐土耕层水力特性。彭有亮等[19]指出,浑水含沙率与生物有机肥配施对土壤水分动态具有协同调控作用,从而抑制蒸发。杨永辉等[20]的长期试验也证实,持续施用有机肥能够显著提升土壤饱和导水率、田间持水量和有效水含量,增强土壤保水能力。

尽管已有大量研究表明土壤调理剂和有机肥均可在一定程度上抑制土壤水分蒸发,但对于层施、混施、表施等不同施用方式如何影响土壤蒸发过程仍缺乏系统比较。基于此,本研究通过室内土柱模拟试验,系统比较土壤调理剂与有机肥在不同施用方式下对土壤水分蒸发的影响规律与机理,以明确其最佳施用方式。研究结果可为旱区农业节水管理和土壤改良剂的高效利用提供理论支持与实践参考。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

供试土壤采自榆林市榆阳区黄土丘陵区典型农田,采样点坐标为38°18′N,109°41′E。土壤类型为风沙土,采集0—20 cm的土壤样品。采集后的土样自然风干,去除植物根系和碎石后通过2 mm筛备用。供试土壤基本性质:容重为1.35 g/cm$^3$,颗粒组成:砂粒62.78%,粉粒31.28%,黏粒5.95%。有机肥由诸城金土地有机肥有限责任公司生产,其主要成分包括二氧化硅≥28%,氧化钙≥30%,腐殖酸≥6%,稀土≥3%,铁+锰+锌+铜+硼+钼≥8%,钛+硒≥2%,pH值为8.5～9.5;土壤调理剂由榆林大学陕北矿区生态修复重点实验室提供,由煤气化渣与羊粪、秸秆等共同好氧发酵腐熟后制成,基本理化性质[21]:有机质22.60 g/kg,有效氮48.28 mg/kg,速效磷1 689 mg/kg,速效钾125 mg/kg。

### 1.2　试验设计

试验于2025年4月25日至5月6日在榆林大学逸夫楼实验室的温室中进行,试验期间室内平均气温18.5 ℃,最高气温28.3 ℃,最低气温12.8 ℃,平均相对湿度60%。蒸发观测周期为12 d。采用室内土柱模拟法。试验土柱为直径和高度均为22 cm的圆柱形PVC管,底部设6个直径1 cm排水孔(孔间距3 cm),并铺设双层滤纸防止土壤流失。土壤风干、过筛后,按容重1.31～1.35 g/cm$^3$分层压实装填,总填土高度20 cm。

试验设置土壤调理剂、有机肥两种添加剂,每种添加剂分别采用层施、混施和表施3种方式施用。层施处理是指在距土柱底部6 cm和13 cm处分别设置1 cm厚的添加剂层;混施处理是指将添加剂与土壤混合均匀后装填;表施处理则是在土柱填充至18 cm

后，于表层添加2 cm厚的添加剂层。共6个施用方式处理，另设裸土对照，合计7个处理。所有土柱填充完成后，将土柱放入水槽中，然后向水槽中加水至土柱10 cm高处。24 h后，当土柱中土壤完全湿润时，将土柱搬出水槽，然后覆盖塑料薄膜静置48 h排除重力水后称重。每个处理设置3次重复。期间每日8:00使用电子天平（精度0.1 g）称量土柱重量，计算日蒸发量，并同步记录直径为22 cm标准蒸发皿蒸发量作为自由水面蒸发对照。并在试验首日，自8:00起至22:00止，每间隔2 h称重1次。数据分析采用Excel 2019和SPSS 13.0软件，绘图采用Origin 2022。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸发量日变化

土壤日均蒸发量与自由水面日均蒸发量能够反映不同施用方式下各处理间土壤水分蒸发速率的差异[22]。图1展示了土壤调理剂与有机肥在不同施用方式下，各处理组土壤水分蒸发量与自由水面蒸发量随时间的变化。

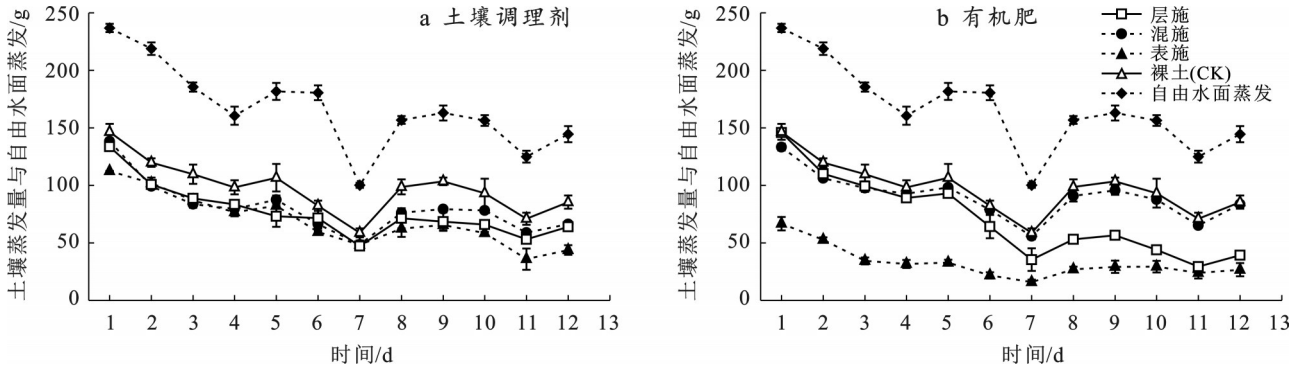


**图1 土壤调理剂与有机肥在不同施用方式下日蒸发量与自由水面蒸发量**

**Fig.1 Daily evaporation and free water surface evaporation of soil conditioner and organic fertilizer under different application methods**

土壤调理剂处理在蒸发过程的前4 d中，土壤平均蒸发量为表施（94.5±14.7 g）<混施（100.2±24.3 g）<层施（101.6±20.5 g）<裸土（118.6±19.4 g）<自由水面蒸发（200.5±31.1 g）。在蒸发的5～7 d，3种处理的平均水分蒸发量之间差值在5%之内；在9～12 d，各处理之间开始出现差异，土壤水分的平均蒸发量为表施（50.9±13.1 g）<层施（62.9±7.3 g）<混施（70.7±8.9 g）<裸土（88.3±13.9 g）<自由水面蒸发（147.2±15.9 g）。

在有机肥处理中，混施处理与裸土的蒸发量曲线高度相似，日均蒸发量差异始终小于5%，且与自由水面蒸发呈正相关。层施处理在试验前期（1—5 d）和混施、裸土保持同步变化，但自第6 d开始出现较大分化，其蒸发量由第5 d的92.9 g急剧下降至第6 d的64.2 g（降幅30.95%），并在后续观测过程中持续低于其他处理方式。表施处理表现出明显的保水效果，第1 d蒸发量为66.8 g，仅为自由水面蒸发量的28.24%，在试验进行到48 h后（即第3 d），其蒸发量下降至34.4 g（降幅48.53%）。第5 d和第8—11 d的蒸发量变化不大，但是整体依然维持持续下降趋势，直至第12 d的蒸发量降至26.8 g，仅为同期自由水面蒸发量的18.46%。

### 2.2 蒸发量日内变化

图2中呈现了土壤调理剂与有机肥在不同施用方式下土壤蒸发量的日动态。在10:00至14:00时段内，土壤蒸发强度持续上升，至14:00时蒸发量升至峰值，随后逐渐呈下降趋势。在12:00至14:00期间，土壤平均蒸发量从高到低依次为自由水面蒸发（49.5±1.4 g）>裸土（30.8±2.1 g）>混施（26.2±2.1 g）>层施（23.8±5.1 g）>表施（21.8±1.4 g）。至22:00时，层施、混施和表施的平均土壤蒸发量较裸土分别降低了19.21%，9.34%和23.72%。

在有机肥处理组中，各处理蒸发量均呈单峰曲线，14:00达到峰值后逐渐下降，至22:00降至全天最低值。昼夜动态可分为两个阶段：在10:00—14:00的蒸发强度的上升阶段，各处理蒸发量排序为：自由水面蒸发（43.5±6.6 g）>裸土（26.4±5.5 g）>混施（23.9±5.5 g）>层施（22.7±4.3 g）>表施（16.6±8.6 g）；而在14:00后的蒸发衰退阶段，3种施肥处理与裸土间的蒸发量差异不显著（$p>0.05$）。值得注意的是，表施处理在中午强蒸发时段（12:00—14:00）展现出显著保水优势，其蒸发量峰值较混施、层施分别降低18.7%和12.4%。

### 2.3 不同施用方式下累积蒸发量动态特征

图3是两种添加剂在不同施用方式下土壤累积蒸发量的变化曲线。可以看出土壤调理剂的土壤累积蒸发量表现为混施（962.6±16.5 g）>层施

(931.1±36.6 g)>表施(833.3±40.6 g)。其累积蒸发量呈递减趋势,累积蒸发量随时间表现出近似线性的变化特征。从占比来看,层施、混施、表施3种处理的平均土壤累积蒸发量依次占自由水面蒸发的46.30%,47.86%和41.43%,而裸土的平均累积蒸发量占比为58.39%。

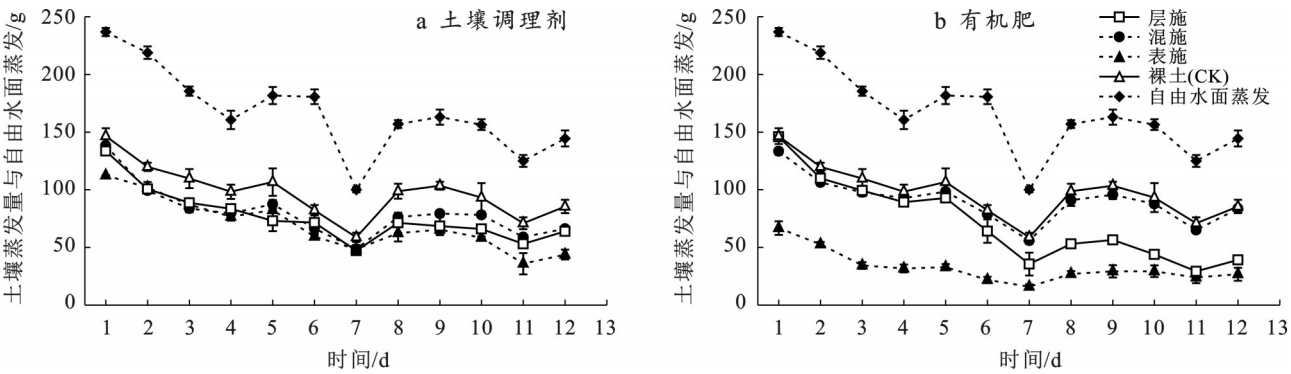


**图2　土壤调理剂与有机肥在不同施用方式下土壤蒸发量日内变化**

**Fig.2　Diurnal changes in soil evaporation under different application methods of soil conditioner and organic fertilizer**

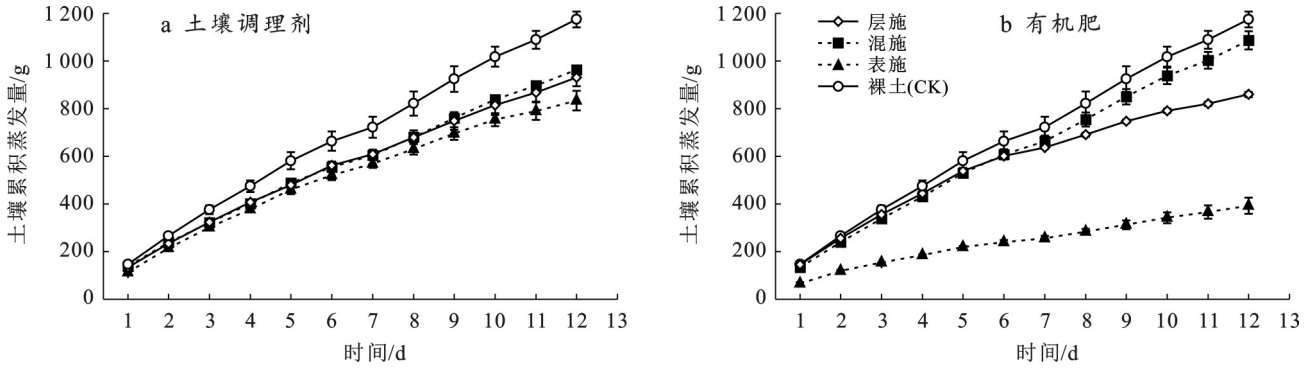


**图3　两种添加剂在不同施用方式下土壤累积蒸发量变化**

**Fig.3　Changes in cumulative soil evaporation under different application methods of two additives**

有机肥不同施用方式下的累积蒸发量变化呈现出不同特征(图3)。裸土(CK)的蒸发量始终处于最高水平(占自由水面蒸发的58.39%)。有机肥处理均能降低蒸发量,但是不同施用方式下效果差异显著($p<0.05$)。其中表施处理在保水方面效果最为理想,其累积蒸发量仅占自由水面蒸发的19.52%,层施和混施分别为42.73%和54.01%。

各处理下土壤累积蒸发量随时间均呈现增长趋势(图3)。为定量评估不同处理的蒸发速率,采用线性函数($E=kT+b$,其中$E$为累积蒸发量,$T$为时间,$k$为累积蒸发速率)进行拟合,拟合结果见表1。

由表1可知,所有处理的决定系数($R^2$)均高于0.9,表明线性模型能很好地描述累积蒸发过程。林钰泽等[23]研究发现,添加剂种类以及施用方式的交互作用会对土壤水分蒸发动态产生影响。通过对比各个处理拟合方程的斜率参数可以发现,裸土对照(CK)的累积蒸发速率是最高的(91.7 g/d),明显超过了各个改良处理,说明土壤改良措施对水分保持是有效的。在土壤调理剂处理中,混施方式的斜率相比于层施、表施分别增加了3.8%和12.7%,呈现出抑制蒸发效果"表施>层施>混施"的变化规律,有机肥处理组也呈现相同的规律。值得注意的是,在相同表施方式下,有机肥处理的累积蒸发速率(OM-表施,27.9 g/d)显著低于土壤调理剂处理(T-表施,64.4 g/d),说明有机肥表施对抑制土壤水分蒸发的效果更为突出。

**表1　不同添加剂与施用方式土壤累积蒸发量随时间变化的直线拟合参数**

**Table 1　Linear fitting parameters of soil cumulative evaporation over time with different additives and application methods**

| 处理 | 拟合方程 | $R^2$ |
|---|---|---|
| T-层施 | $y=70.8x-1.48$ | 0.98 |
| T-混施 | $y=75.5x-1.30$ | 0.99 |
| T-表施 | $y=64.4x-1.60$ | 0.97 |
| OM-层施 | $y=62.9x-2.62$ | 0.95 |
| OM-混施 | $y=85.2x-0.89$ | 0.99 |
| OM-表施 | $y=27.9x-2.26$ | 0.97 |
| 裸土(CK) | $y=91.7x-1.00$ | 0.98 |

注:T代表土壤调理剂;OM代表有机肥。

# 3 讨 论

## 3.1 施用方式对土壤水分蒸发的影响

从日均蒸发量和累积蒸发量的变化特征来看，不同施用方式对土壤水分蒸发的抑制作用存在差异，表施处理在大多数观测阶段均表现出较低的蒸发水平，而混施和层施的抑制效果相对较弱。与裸土相比，各类改良措施均能够不同程度地降低蒸发强度，说明通过外源添加剂调节土壤表层条件，对减少土壤水分无效损失具有实际意义。

从作用位置来看，表施添加剂直接分布于土壤—大气界面附近，更接近蒸发发生的关键区域，这可能是其抑制效果较为稳定的重要原因。表层形成的覆盖结构在一定程度上削弱了水汽向大气扩散的动力条件，同时也限制了液态水通过毛细作用向表层补给的速率，从而延缓了蒸发过程的进行。已有秸秆覆盖、覆砂等相关研究表明，表层覆盖能够有效降低土壤蒸发并提高土壤含水量[24-25]，本研究结果与其结论基本一致。

## 3.2 蒸发的阶段性特征及日变化

从时间变化特征来看，土壤水分蒸发呈现出较为明显的阶段性特征。在试验初期，土壤含水量较高，蒸发强度相对较大，各处理之间的差异主要体现在蒸发速率的高低。随着试验的推进，土壤中水分逐渐减少，蒸发过程从能量条件控制为主，逐步转变为水分供给限制的阶段，这一变化过程在土壤蒸发研究中较为常见[26-27]。

在蒸发初期，表施处理的蒸发量明显低于其他处理，尤其是在有机肥表施条件下，蒸发强度下降更为迅速。进入蒸发中后期后，混施和层施处理的抑制作用有所减弱，而表施处理仍能够维持相对较低的蒸发水平，说明表层覆盖在延缓土壤进入水分受限蒸发阶段方面可能发挥了一定作用。从日变化尺度来看，各处理蒸发量在中午达到峰值，随后逐渐降低，整体变化趋势与气温变化基本一致，表明温度仍是驱动土壤蒸发的主要环境因子。

## 3.3 有机肥对土壤水分蒸发的影响

从累积蒸发量的变化及线性拟合结果可知，有机肥不同施用方式之间的蒸发差异较为明显。其中，表施处理在整个观测期内均保持较低的累积蒸发量，其累积蒸发速率显著低于层施和混施处理，表明在相同时间尺度下，有机肥表施能够有效降低土壤水分的蒸发速率。这与王晓娟等[28]和张秀颖等[29]的研究结果一致，施用有机肥可显著提高土壤含水量，减少土壤水分蒸发，提高土壤持水量。此外，在有机肥分解过程中能够持续吸附和保持水分，从而在蒸发强烈的条件下提供长期保水作用[30]。

# 4 结 论

（1）施用方式显著改变了蒸发的阶段性和日变化规律。蒸发过程呈现阶段性特征，如表施处理在初期（0—4 d）快速抑制蒸发，有机肥表施首日蒸发量仅为自由水面的28.24%。蒸发量日变化方面，所有处理在14:00达到峰值，但表施在高温时段（12:00—14:00）仍能降低蒸发量23.7%以上。有机肥在抑制水分蒸发方面总体优于土壤调理剂。且有机肥表施的累积蒸发量仅占自由水面的19.52%，凸显其更持久的保水能力。

（2）表施是最优方式，其效果显著优于层施和混施。有机肥表施是抑制风沙土水分蒸发的有效措施，这一发现为干旱区风沙土的改良与水分管理提供了直接依据。本研究验证了有机肥表施在抑制水分蒸发方面是有效的，并且对其内在机理的解释，同样是评估该方法的关键。因此，我们将在未来研究工作中重点关注试验过程中的关键物理指标（如通气性、透水性、吸附作用等），并建立这些指标与水分蒸发之间的关系模型，为风沙土的改良提供理论支撑。

## 参考文献（References）

[1] 贾小旭，邵明安，张晨成，等.黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟[J].水科学进展，2016，27(4)：520-528.
Jia Xiaoxu, Shao Ming'an, Zhang Chencheng, et al. Variation and simulation of soil water content within different soil depths along the south-north transect of the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 520-528.

[2] 李渊博，李胜龙，肖波，等.黄土高原水蚀风蚀交错区藓结皮覆盖土壤的蒸发特征[J].水土保持学报，2020，34(5)：208-215.
Li Yuanbo, Li Shenglong, Xiao Bo, et al. Evaporation characteristics of soil covered with moss crust in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 208-215.

[3] 贾振江，赵广兴，李王成，等.宁夏中部干旱带砂土混合覆盖下土壤蒸发估算[J].水土保持学报，2022，36(2)：219-227.
Jia Zhenjiang, Zhao Guangxing, Li Wangcheng, et al. Estimation of soil evaporation under mixed sand cover in arid regions of central Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 219-227.

[4] 蔡永坤，李毅，冯浩.不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分

蒸发的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):273-277.
Cai Yongkun, Li Yi, Feng Hao. Effects of gravel-sand mulching degree and size on soil moisture evaporation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6):273-277.

[5] 刘文白,周健,苏跃宏.西北旱区高原沙地调查和基本性质试验[J].科学技术与工程,2002,2(3):56-58.
Liu Wenbai, Zhou Jian, Su Yuehong. Investigation and test of plateau sand land of northwest droughty zone [J]. Science Technology and Engineering, 2002,2(3):56-58.

[6] 王丽娜,王迪,任翠梅,等.土壤改良剂的应用现状[J].中国农学通报,2024,40(30):84-88.
Wang Lina, Wang Di, Ren Cuimei, et al. Current application status of soil improvers [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(30):84-88.

[7] 陈小明,吴岳庭,蒋艺,等.土壤改良剂和套种作物对幼龄橘园酸性土壤理化性质的影响[J].中国土壤与肥料,2024(3):63-69.
Chen Xiaoming, Wu Yueting, Jiang Yi, et al. Effects of soil amendments combined with intercropping on physical and chemical properties of acid soil in young citrus orchards [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2024(3):63-69.

[8] 姜雪,郭丽琢,牛济军,等.不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应[J].江西农业大学学报,2024,46(4):1086-1098.
Jiang Xue, Guo Lizhuo, Niu Jijun, et al. Improvement effect of different amendments on soil fertility status of saline alkali soil in Hexi irrigation area [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2024,46(4):1086-1098.

[9] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149.
Suo Linna, Ma Jie, Liu Baocun, et al. Soil conditioner application status and application of risk research [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1141-1149.

[10] 朱磊,古文哲,刘小铭,等.煤矸石土壤调理剂对毛乌素沙地柳枝稷生长的影响[J].山西农业科学,2024,52(5):60-67.
Zhu Lei, Gu Wenzhe, Liu Xiaoming, et al. Effects of coal gangue soil conditioner on growth of switchgrass in Mu Us sandy land [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024,52(5):60-67.

[11] Ai Feng, Zheng Shimei, Zeng Chunmei, et al. Soil ecosystem multifunctionality and growth characteristics of *Leymus chinensis* were enhanced after sandy soil amendment with vermicompost and soil conditioner in soil-plant-microbe system [J]. Environmental Technology & Innovation, 2025,39:104226.

[12] 杨金翰,田小明,胡晨阳,等.不同灌溉施肥组合下添加调理剂对土壤水分养分的影响[J].华北农学报,2024,39(S1):175-186.
Yang Jinhan, Tian Xiaoming, Hu Chenyang, et al. Effects of adding conditioner on soil moisture and nutrients under different irrigation and fertilization combinations [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2024, 39(S1):175-186.

[13] 李丰杰,周丕生,李跃忠.不同用量厨余垃圾堆肥对土壤理化性质的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2016,34(5):92-98.
Li Fengjie, Zhou Pisheng, Li Yuezhong. Effect of different amount of kitchen waste on physical and chemical properties of soil [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2016,34(5):92-98.

[14] 崔恒,包兴国,车宗贤,等.风沙土不同用量有机酸土壤调理剂应用效果综合评价[J].中国土壤与肥料,2022(8):39-46.
Cui Heng, Bao Xingguo, Che Zongxian, et al. Comprehensive evaluation of different quantities of organic acid soil conditioner application in aeolian sandy soil [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2022(8):39-46.

[15] 张娟,徐宁彤,孟庆峰,等.有机肥施用年限对土壤有机碳组分及其来源与玉米产量的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):107-113.
Zhang Juan, Xu Ningtong, Meng Qingfeng, et al. Effect of years of manure fertilizer application on soil organic carbon component, its source and corn yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(2):107-113.

[16] 周慧,史海滨,张文聪,等.有机无机肥配施对盐渍化土壤微生物量和呼吸的影响[J].农业工程学报,2021,37(15):86-95.
Zhou Hui, Shi Haibin, Zhang Wencong, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on soil microbial biomass and soil respiration in saline soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(15):86-95.

[17] 马阳,张立宏,张培,等.不同基肥措施对甜瓜产量和土壤性质、细菌多样性的影响[J].中国土壤与肥料,2022(8):104-111.
Ma Yang, Zhang Lihong, Zhang Pei, et al. Effects of different basal fertilizer measures on muskmelon yield, soil properties and bacterial diversity [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(8):104-111.

[18] 赵敏,王鑫平,赵聪,等.有机肥配施保水剂对褐土耕层土壤水力特性的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):20-29.
Zhao Min, Wang Xinping, Zhao Cong, et al. Effect of organic fertilizer combined with water-retaining agents

on soil hydraulic characteristics in topsoil layer of brown soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1):20-29.

[19] 彭有亮,费良军,介飞龙,等.浑水灌溉和有机肥对土壤水分运移、蒸发及淋溶的影响[J].农业工程学报,2023,39(14):125-135.
Peng Youliang, Fei Liangjun, Jie Feilong, et al. Effects of organic fertilizer on soil water transport, evaporation and leaching under muddy water irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):125-135.

[20] 杨永辉,张运红,高翠民,等.长期增施有机肥对土壤物理特征、微生物生物量碳氮及土壤酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2025,43(3):107-115.
Yang Yonghui, Zhang Yunhong, Gao Cuimin, et al. Effects of long-term organic fertilizer application on soil properties, microbial biomass, carbon and nitrogen content, and soil enzyme activity [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025,43(3):107-115.

[21] 李强,艾锋,王玺,等.煤基固废协同矿山土壤生态修复的理论解析与实践探索:以陕西榆林市为例[J].西北地质,2023,56(3):70-77.
Li Qiang, Ai Feng, Wang Xi, et al. Theoretical analysis and practical exploration on ecological restoration of mines with multi-source solid wastes: Example from Yulin City, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2023,56(3):70-77.

[22] 李彦霈,邵明安,王娇.蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J].土壤学报,2018,55(3):633-640.
Li Yanpei, Shao Ming'an, Wang Jiao. Effects of earthworm cast mulch on soil evaporation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018,55(3):633-640.

[23] 林钰泽,司丹彤,徐勤学,等.生物炭对矿区不同压实度土壤水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持学报,2025,39(3):105-115.
Lin Yuze, Si Dantong, Xu Qinxue, et al. Effects of biochar on soil water infiltration and evaporation in soils with different compaction degrees in mining areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(3):105-115.

[24] 殷文,柴强,赵连豪,等.西北旱区覆盖措施对土壤水分调控及生态改良效应研究进展[J].灌溉排水学报,2025,44(6):11-21.
Yin Wen, Chai Qiang, Zhao Lianhao, et al. Effects of mulching on soil water regulation and ecological improvement in arid regions in northwest China: A review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025,44(6):11-21.

[25] 王兴,李王成,董亚萍,等.压砂地不同砂土混合比下土壤水分蒸发动态研究[J].中国农村水利水电,2019(8):56-62.
Wang Xing, Li Wangcheng, Dong Yaping, et al. Dynamic research on soil water evaporation under different sand mixing ratio in pressed sand land [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(8):56-62.

[26] 孙池涛,邓亚鹏,张俊鹏,等.秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究[J].农业机械学报,2020,51(12):284-291.
Sun Chitao, Deng Yapeng, Zhang Junpeng, et al. Model on coastal soil evaporation resistance under straw coverage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(12):284-291.

[27] 高鹏程,张国云,孙平阳,等.秸秆覆盖条件下土壤水分蒸发的动力学模型[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(10):55-58.
Gao Pengcheng, Zhang Guoyun, Sun Pingyang, et al. Dynamics model of moisture evaporation of soil covered by stalks [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2004,32(10):55-58.

[28] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):419-425.
Wang Xiaojuan, Jia Zhikuan, Liang Lianyou, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(2):419-425.

[29] 张秀颖,蔡江平,王聪,等.不同培肥模式对辽西北沙化草地土壤改良与植被恢复的影响[J].应用生态学报,2024,35(1):55-61.
Zhang Xiuying, Cai Jiangping, Wang Cong, et al. Effects of different fertilization patterns on soil improvement and vegetation restoration of desertified grassland in northwest Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(1):55-61.

[30] 舒方瑜,董勤各,冯浩,等.不同有机物料对黄土高原治沟造地土壤水分运移的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):74-79.
Shu Fangyu, Dong Qinge, Feng Hao, et al. Effects of different organic materials on water movement in gully land consolidation soil on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):74-79.