

风速和秸秆覆盖对土壤水分蒸发影响的模拟试验研究

李晓明¹, 王 飞^{1,2}, 胡 林¹, 穆兴民^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过室内模拟试验方法, 研究了不同风速(静风、0.5、1.5 m/s)和秸秆覆盖量(0、4 120、8 240 kg/hm²)对土壤水分蒸发的影响。结果表明:(1)土壤水分蒸发受风速和秸秆覆盖的明显影响,当土壤含水量大于田间持水量的 70%、覆盖量一定时(0.4 120 kg/hm²)时,风速 0 m/s 与 1.5 m/s 之间的土壤日蒸发量差异均显著;而秸秆覆盖量达到 8 240 kg/hm²时,风速对土壤蒸发量没有显著影响。当土壤含水量大于田间持水量的 55%、不同风速处理时,土壤累积蒸发量随覆盖量的增大而显著减少。(2)土壤水分累积蒸发量(E)与时间(t)之间呈显著的指数关系($E = at^b$),而且参数 a 和 b 与风速和秸秆覆盖量处理存在明显的关系。

关键词: 土壤水; 蒸发; 秸秆覆盖; 风速; 干旱半干旱区

中图分类号: S157.4⁺2; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000 7601(2011)03-0186-05

水资源高效利用是 21 世纪农业持续发展的关键^[1]。在干旱半干旱地区,土壤的无效蒸发是影响土壤水分利用效率的重要途径。在实行夏季休闲的地区,土壤的直接蒸发量约占降雨量的 60%,在整个一年生作物的生长期间,蒸发到大气中的水有一半直接来自土壤蒸发^[2]。

秸秆覆盖在蓄水保墒和培养土壤肥力等方面具有重要作用。研究证明:作物秸秆和砾石覆盖等能够减少土壤蒸发^[3,4],不同麦秸覆盖量可以减少夏玉米行间土壤蒸发^[5],并提高农田水分利用率^[6,7],国外学者的研究也得出类似的结论^[8,9]。此外,秸秆覆盖能够通过影响近地表风速而影响土壤蒸发^[10~13],然而,国内外学者有关风速对土壤蒸发影响的研究很少,而风速和秸秆覆盖二者相结合的研究成果更是鲜见报道。因此,本研究通过室内模拟试验的方法,研究了不同风速和秸秆覆盖对土壤蒸发的影响,以期旱区农业的持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2010 年 1 月 11 日~3 月 12 日在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟干旱大厅内进行。供试覆盖材料为当年收割并晾干的小麦秸秆。供试土壤为耕层瘠土,采自陕西省杨凌示范区西北农林科技大学旱区

农业水土工程教育部重点实验室的灌溉站农地,质地为重壤,土壤采回后用 2 cm 孔径的铁筛过筛,经自然风干后备用。试验所用瘠土的田间持水量为 23.8%,饱和含水量为 28.9%^[14]。

1.2 试验设计

将土壤装入长 48 cm×宽 38 cm 的方形容器内,容器的四周与底部密闭,顶部无盖。装土容重设定为 1.3 g/cm³,装土深度为 16 cm。对土壤湿润时,在表面放置渗水布膜,让水慢慢渗入土壤中,灌水量为供试土壤的田间持水量。待灌完水后,为防止表层土壤水分蒸发,用一层塑料薄膜覆盖土柱,让水慢慢渗入土壤。24 h 后取掉,测定的土壤含水量为起始含水量。对土表进行小麦秸秆覆盖处理,各处理秸秆覆盖厚度分别为 0、1.2、2.4 cm,对应的秸秆覆盖量分别为 0、4 120、8 240 kg/hm²。

试验采用风扇送风,用衡欣 AZ8912 风速仪连续测量土壤表层风速 1 min,每隔 1 s 记录一次数据,最后求平均值作为处理风速。根据不同处理距风扇的远近,测得风速的变化范围为 0~2.5 m/s,但由于大于 1.5 m/s 的风速覆盖范围比较小,考虑到实验的可操作性,本实验设置 3 个风速水平,即静风(0 m/s)、0.5 m/s、1.5 m/s,以静风作为对照,每个水平设置 3 个重复。每天中午 12:00 时(北京时间)对其进行吹风处理,吹风时长为 5 h/d。每隔 3 d 的下午 17:00 时对容器进行称重,测定土壤水分损失量,同时利用温湿度计记录环境的温度和湿度。试验中由

收稿日期: 2010 11 26

基金项目: 国家科技支撑计划项目黄土高原水土流失综合治理工程关键支撑技术研究(2006BAD09B00); 欧盟框架计划项目(FP6, DE-SIRE, 037046); 西北农林科技大学留学归国人员科研专项

作者简介: 李晓明(1985—),女,硕士研究生,研究方向为水土保持耕作技术。

* 通讯作者: 王 飞(1971—),男,博士,副研究员,从事水土保持环境效应评价研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn.

于容器内土壤水分没有其他形式损失, 因此, 土壤水分的损失量即为土壤水分的蒸发量。

试验设计为秸秆覆盖量和风速两个因素、每个因素 3 个水平(表 1)。用 T_{ij} 表示各处理组合, 其中 $i = 1, 2, 3$ 分别代表覆盖量为 0、4 120、8 240 kg/hm^2 , $j = 1, 2, 3$ 分别代表风速为静风、0.5、1.5 m/s , 如 T_{22}

表示覆盖量为 4 120 kg/hm^2 且风速为 0.5 m/s 的处理。每个处理设置 3 次重复, 以无覆盖且静风(T_{11})为对照。对不同风速和覆盖条件下土壤累积蒸发量与时间的关系进行回归分析。所有试验数据采用 Excel 2003 进行处理、制表, 采用 Origin7.5 进行制图、回归分析和方差分析。

表 1 影响土壤水蒸发因子的试验设计

Table 1 Experiment design of factors affecting soil evaporation

处理 Treatment	覆盖量 Mulching (kg/hm^2)	风速 Wind speed (m/s)	处理 Treatment	覆盖量 Mulching (kg/hm^2)	风速 Wind speed (m/s)	处理 Treatment	覆盖量 Mulching (kg/hm^2)	风速 Wind speed (m/s)
T_{11} (CK)	0	0	T_{21}	4120	0	T_{31}	8240	0
T_{12}	0	0.5	T_{22}	4120	0.5	T_{32}	8240	0.5
T_{13}	0	1.5	T_{23}	4120	1.5	T_{33}	8240	1.5

表 2 高含水量阶段的土壤日蒸发量变化

Table 1 Soil water evaporation on the stage of high water content

处理 Treatment	灌水量 Irrigation (ml)	日蒸发量 Evaporation (g/d)	比对照减少 Decrease to CK(%)
T_{11} (CK)	8866	286	—
T_{12}	8866	360	- 26
T_{13}	8866	424	- 48
T_{21}	8866	74	74
T_{22}	8866	137	52
T_{23}	8866	173	40
T_{31}	8866	178	38
T_{32}	8866	92	68
T_{33}	8866	130	55

2 结果与分析

2.1 室内温度和湿度的时序变化

温度和湿度是影响土壤水分蒸发量的重要因子, 在主要试验期内大气的温度和湿度相对稳定。气温的变幅为 17.0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 23.8 $^{\circ}\text{C}$, 平均温度为 20.02 $^{\circ}\text{C}$; 大气湿度的变幅为 18.0% ~ 29.1%, 平均湿度为 21.63%。各处理的土壤日蒸发量大小除受土壤含水量影响外, 还受大气温湿度的影响, 试验期 13~ 15、22~ 24、37~ 39 和 49~ 51 d 土壤蒸发异常增大(图 1), 这主要是由于大气的温度较高而湿度较低, 导致了土壤的蒸发异常强烈。

2.2 土壤水日蒸发过程与风速和秸秆覆盖的关系

2.2.1 土壤含水量较高阶段日蒸发量的变化 当土壤含水量大于田间持水量的 80% 时, 土壤水丰富, 导水率大, 在大气蒸发力的作用下, 表层土壤水分持续的从土体内部得到补给, 最大限度地供给表层蒸发。从表 2 可以看出: 9 种处理土壤日蒸发量顺序为 $T_{13} > T_{12} > T_{11} > T_{31} > T_{23} > T_{22} > T_{33} > T_{32} > T_{21}$, 其主要原因是土壤含水量较高时, 土壤蒸发率主要受大气蒸发力控制, 风促进了土壤水分的蒸发, 秸秆覆盖抑制了土壤水分的蒸发。与对照相比, 无覆盖且风速为 1.5 m/s 时土壤蒸发量增加幅度最大为 48%; 覆盖 4 120 kg/hm^2 且静风时, 土壤蒸发降低幅度最大为 74%。单因素方差分析表明: 当覆盖量一定时(0、4 120 kg/hm^2), 风速 0 m/s 与 1.5 m/s 之间土壤次日蒸发量差异均显著($P < 0.05$); 但当覆盖量达到 8 240 kg/hm^2 时, 不同风速间差异不显著。当风速条件一定时, 与无覆盖相比, 秸秆覆盖对土壤次日蒸发影响也有显著影响($P < 0.05$), 但秸秆覆盖量 4 120 和 8 240 kg/hm^2 之间差异不显著。

2.2.2 风速和秸秆覆盖下土壤日蒸发量变化 对秸秆覆盖量分别为 0、4 120 和 8 240 kg/hm^2 时不同风速的土壤连续 60 d 的动态监测, 结果见图 1a、b、c, 可以看出: 土壤蒸发总体上表现出前期快、后期慢的趋势。

在土壤无覆盖的情况下(图 1a), 土壤含水量大于田间持水量 60% 的 1~ 15 d, 土壤的日蒸发量变化明显, 静风和风速 1.5 m/s 之间差异显著($P < 0.05$); 但当土壤含水量小于田间持水量的 40% 时, 有风处理的土壤日蒸发量逐渐降低开始接近静风处理, 各处理间日蒸发量差异不显著。

在秸秆覆盖量为 4 120 kg/hm^2 的情况下(图 1b), 土壤含水量在田间持水量的 55% ~ 100% 之间时(大约 1~ 40 d), 各处理内土壤的日蒸发量变化不明显; 但当土壤含水量大于田间持水量的 70% 时, 静风和风速为 1.5 m/s 间差异显著($P < 0.05$)。

在秸秆覆盖量为 8 240 kg/hm² 的情况下(图 1c), 整个试验期间土壤含水量在田间持水量的 50% ~ 100% 之间变化, 土壤的蒸发量受含水量的影

响不太明显, 整个蒸发过程中处理内和处理间日蒸发量受风力的影响均不明显。

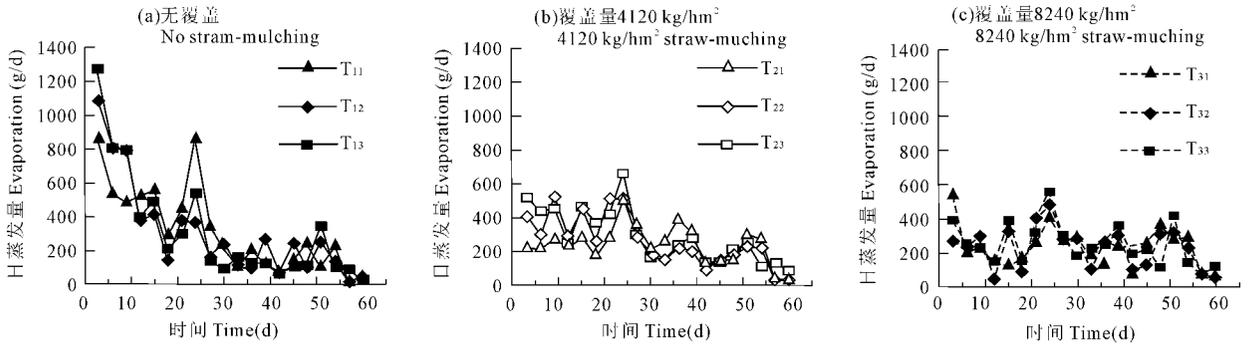


图 1 风速和秸秆覆盖对土壤日蒸发量的影响

Fig. 1 Influence of wind speed and straw mulching on soil water evaporation rate

2.3 土壤累积蒸发量与风速和秸秆覆盖量的关系

2.3.1 风速和秸秆覆盖下土壤水蒸发曲线 在整个土壤水蒸发过程中, 累积蒸发量随时间的增加而增大, 表现为开始增加快(1~ 24 d), 逐渐减慢(25~ 50 d), 最后几乎趋于恒定的变化趋势(51~ 60 d)(图 2)。

当风速一定时, 不同秸秆覆盖量的土壤累积蒸发量均有显著差异, 说明无论是在静风还是有风的情况下, 秸秆覆盖量对土壤的累积蒸发量均具有显著的抑制作用($P < 0.05$)。

当土壤含水量大于田间持水量的 55% 时, 无覆盖下风速 1.5 m/s 和静风、风速 0.5 m/s 处理间差异显著($P < 0.05$), 但是静风和风速 0.5 m/s 的差异未

达显著水平; 秸秆覆盖量为 4 120 kg/hm² 时静风和风速 0.5、1.5 m/s 处理间差异显著($P < 0.05$), 但是风速 0.5 m/s 和 1.5 m/s 处理间未达显著性水平; 秸秆覆盖量为 8 240 kg/hm² 时, 静风和风速 0.5、1.5 m/s 间差异均不显著。

从风速和秸秆覆盖的交互作用对土壤累积蒸发量影响的比较可以看出(图 2): 当土壤含水量大于田间持水量的 55% 时, 无覆盖下风速为 1.5 m/s 的土壤累积蒸发量最大显著大于其他处理($P < 0.05$); 秸秆覆盖量为 4 120 kg/hm² 且静风情况下, 土壤累积蒸发量最小, 但是它与覆盖量为 8 240 kg/hm² 时各风速处理的土壤累积蒸发量差异不显著。

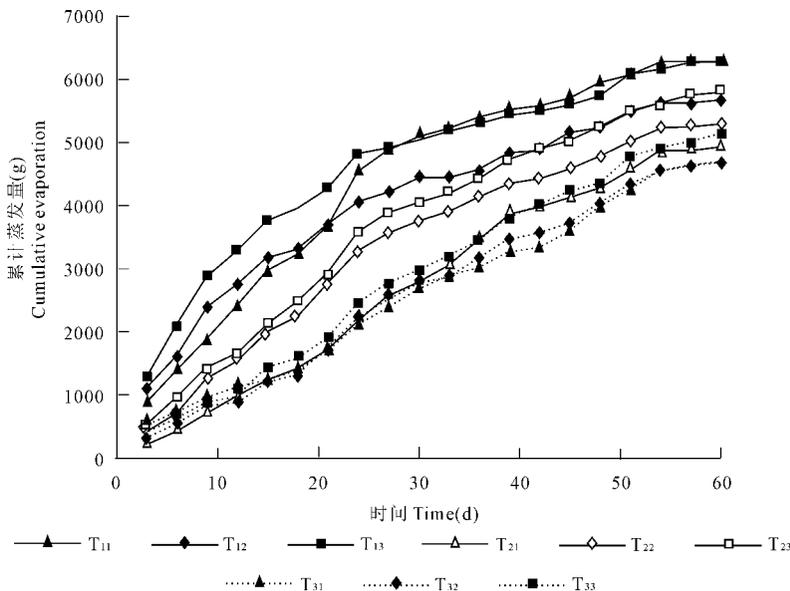


图 2 风速和秸秆覆盖对土壤水分累积蒸发量的影响

Fig. 2 Influence of wind speed and straw mulching on cumulative soil water evaporation

2.3.2 累积蒸发量与时间及风速和秸秆覆盖的关系 Gardner 及其他研究者关于一维裸土蒸发中累积蒸发量随时间变化的理论和实验分析结果表明, 累积蒸发量 E 与时间 t 的平方根呈线性关系^[15, 16]: $E = A_E t^{0.5}$, 式中 E 为累积蒸发量(g); A_E 为与土壤性质有关的系数。经实测资料分析, 覆盖和风速处理下土壤累积蒸发量与时间的关系可表示为 $E = at^b$, 其中 a 和 b 的取值如表 3。

表 3 土壤水分累积蒸发量 E 与时间 t 的拟合曲线参数

Table 3 Parameters for fitting a curve between accumulative soil evaporation and time

处理 Treatment	a	b	R^2	$a \cdot b$	$b - 1$
T ₁₁	0.675***	0.543***	0.855***	0.367	-0.457
T ₁₂	0.845***	0.468***	0.969***	0.395	-0.532
T ₁₃	1.146***	0.422***	0.947***	0.484	-0.578
T ₂₁	0.114***	0.920***	0.959***	0.105	-0.08
T ₂₂	0.343***	0.691***	0.966***	0.237	-0.309
T ₂₃	0.356***	0.691***	0.950***	0.246	-0.309
T ₃₁	0.115***	0.915***	0.968***	0.105	-0.085
T ₃₂	0.107***	0.937***	0.967***	0.100	-0.063
T ₃₃	0.132***	0.902***	0.985***	0.119	-0.098

注: *** 表示相关关系达到极显著性水平 ($P < 0.001$)。

Note: *** represents significance at 0.001 level.

从表 3 可以看出, 秸秆覆盖量增加时, a 不断减少, b 缓慢增加, 当 $t < 1$ 时, 土壤水的累积蒸发量减少, 有利于土壤保水; 而风速增加时, a 不断增加, b 缓慢减少或稳定, 当 $t < 1$ 时, 土壤水的累积蒸发量增加, 有利于土壤失水。但当 $t \geq 1$ 时, 土壤水的累积蒸发量均表现出相反的规律。

由式 $E = at^b$ 可得, 土壤水分蒸发速率 $dE/dt = a \cdot b \cdot t^{(b-1)}$, 说明 b 是影响土壤水分蒸发速率的参数, 其中 $0 < b < 1$ 。由 $dE/dt = a \cdot b \cdot t^{(b-1)}$ 可知, 土壤水分蒸发速率与 $a \cdot b$ 和 $t^{(b-1)}$ 有关, 当 $a \cdot b$ 和 $t^{(b-1)}$ 增大时, 土壤蒸发速率也增大。相同处理中, $a \cdot b$ 和 $b-1$ 为常数(具体见表 3), 土壤水分蒸发速率只与 t 有关。当 $t \geq 1$ 时, 不同处理的土壤水分蒸发速率与 $a \cdot b$ 和 $b-1$ 有关, $a \cdot b$ 和 $b-1$ 越大, 土壤水分蒸发速率越大。从表 3 中可以看出, 所有覆盖下有风处理的 $a \cdot b$ 值均小于对照, 所有无覆盖下有风处理的 $a \cdot b$ 值均大于对照; 而 $b-1$ 却是表现出相反的规律, 随着时间的增加, 与对照相比, 其相对变化量增大。

3 结果与讨论

1) 在整个试验期间, 无覆盖下不同风速处理间

土壤日蒸发量的差异最大, 随着秸秆覆盖量的增加, 土壤水分日蒸发量的变化趋于平稳, 这与田间实际情况吻合良好^[17]。

另外, 由于本试验在室内进行, 与农田试验相比, 土壤的温湿度更容易受大气的影 响, 当大气干燥、气温较高时, 土壤的蒸发量很容易增大; 而当阴雨天气时, 大气的湿度大, 土壤的蒸发量很容易减小。

2) 风速是影响土壤水分蒸发的重要因子。在整个试验期间, 当土壤含水量大于田间持水量的 70%、覆盖量一定时(0.4 120 kg/hm²) 时, 风速 0 m/s 与 1.5 m/s 之间土壤水分的日蒸发量差异显著; 但秸秆覆盖量为 8 240 kg/hm² 时, 风速对土壤水分日蒸发的作用不再明显。说明无覆盖和少量覆盖时, 1.5 m/s 的风速对土壤水分的蒸发具有促进作用; 但当秸秆覆盖增加到一定量时, 小于 1.5 m/s 的风速对土壤水分蒸发所起的作用不明显。

本次试验研究的瘠土主要分布在关中平原区, 而李天军等^[18]通过分析关中地区 31 个气象站 1961 ~ 2001 年 41 a 以来的逐月气象资料, 发现 80% 以上的区域年平均风速小于 2.5 m/s, 超过 50% 的地区风速在 1.0~ 2.0 m/s 之间, 结合试验条件的限制, 最终本次试验研究的风速确定为 0、0.5 m/s 和 1.5 m/s。而后续的试验, 将在改进试验条件的基础上进行较大风速的研究。

3) 当土壤含水量大于田间持水量的 55% 时, 对不同风速和覆盖条件下的土壤累计蒸发量进行比较, 发现无覆盖下风速为 1.5 m/s 时土壤的累积蒸发量最大且显著大于其他各处理。因此, 在干旱半干旱地区土壤含水量较高时, 特别是灌溉期和降雨量较大的季节, 采用增加覆盖的方法可以有效的增加土壤水分入渗量, 有效抑制因风力作用引起的土壤水分无效损耗。

4) 无覆盖静风和无覆盖风速为 0.5 m/s 时, 蒸发的累积蒸发量均与时间平方根呈线性关系, 这一结论符合 Gardner 关于一维裸土蒸发的理论关系; 进一步分析不同风速和秸秆覆盖下土壤水分累积蒸发量与时间的关系符合方程 $E = at^b$ 。土壤水的累积蒸发量与 a 、 b 有关, 当 $t < 1$ 时, 秸秆覆盖有利于土壤保水, 而风速有利于土壤失水。不同处理的土壤水分蒸发速率与 $a \cdot b$ 和 $b-1$ 有关, 当时间相同($t \geq 1$) 时, $a \cdot b$ 和 $b-1$ 越大, 土壤水分蒸发速率越大。

致谢: 感谢西北农林科技大学资源环境学院刘明辉和中国科学院水利部水土保持研究所范青城等

同学在试验过程中给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 山 仑, 刘忠民, 辛业全, 等. 宁夏山区草田轮作研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 60-68.
- [2] 李开元, 李玉山, 邵明安, 等. 土壤保墒性能与土壤水分有效性综述[J]. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1991, (13): 94-104.
- [3] 宋凤斌, 戴俊荣. 干旱胁迫下秸秆覆盖增强玉米耐旱性的研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 58-61.
- [4] 王 俊, 李凤民, 贾 宇. 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[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 77-82.
- [5] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田间土壤蒸发和地温的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1).
- [6] 孟 毅, 蔡焕杰, 王 健, 等. 麦秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 131-135.
- [7] 王改玲, 郝明德, 李仲谨. 不同覆盖物和蒸发抑制剂对土壤蒸发影响的研究初报[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 133-136.
- [8] Shangning Ji, Paul W. Unger. Soil Water Accumulation under Different Precipitation, Potential Evaporation, and Straw Mulch Conditions [J]. Soil Sci Soc Am J, 2001, 65: 442-448.
- [9] Klocke N L, Currie R S, Aken R M. Soil water evaporation and crop residues [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1): 103-110.
- [10] 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.
- [11] Fox M J. A technique to determine evaporation from dry stream beds [J]. Journal of Applied Meteorology, 1968, 8: 697-701.
- [12] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman-Monteith 公式的双源模型的改进 [J]. 水利学报, 2000, (5): 6-11.
- [13] Denisov Yu M, Sergeev A I, Bezborodov G A, et al. Moisture evaporation from bare soils [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(3): 175-182.
- [14] 张立强, 汪有科, 贡学锋, 等. 不同水分状况下秸秆覆盖量对玉米根、冠生长的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 46-51.
- [15] Gardner W R. Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1959, 23: 183-187.
- [16] Gardner H R, Gardner W R. Relation of water application to evaporation and storage of soil water [J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1969, 33: 192-196.
- [17] 刘 超, 汪有科, 湛景武, 等. 秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响 [J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 448-451.
- [18] 李天军. 关中地区参考作物蒸发蒸腾量的预报及对气候变化响应的研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

Impact of wind speed and straw mulching on soil water evaporation

LI Xiao-ming¹, WANG Fei^{1,2}, HU Lin¹, MU Xing-min^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The impacts of wind speed and straw mulching on soil water evaporation were measured and analyzed with 9 treatments of three wind speeds (calm wind, 0.5 or 1.5 m/s) and three straw-mulching levels (0, 4 120, or 8 240 kg/hm²). The results showed that when the water content was 70% of the field moisture capacity and mulching (0, 4 120 kg/hm²) was the same, the soil water evaporation with wind speed 1.5 m/s was significantly higher than other treatments; when the water content was higher than 55% of the field moisture capacity, the cumulative soil water evaporation with no mulching and wind speed 1.5 m/s was far more than that of other treatments. There lies an exponential relationship between the cumulative soil water evaporation (E) and time (t) ($E = at^b$), and the parameters (a and b) have clear differences among the treatments of wind speed and straw mulching levels.

Keywords: soil water; evaporation; straw mulching; wind; arid and semi arid region