

沟灌夏玉米棵间土壤蒸发生态规律的试验研究

孙景生¹, 康绍忠², 王景雷¹, 李晓东¹, 宋 妮¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要: 棵间土壤蒸发是农田土壤耗水的重要组成部分。该文采用两种规格的微型棵间蒸发皿(Micro-Lysimeter)分别测定沟灌夏玉米田沟、垄土面蒸发量, 并对沟灌条件下夏玉米棵间土壤蒸发与作物蒸腾变化规律进行了试验研究, 分析了相对棵间土壤蒸发强度与土壤含水率的关系以及棵间土壤蒸发强度与作物叶面积指数的关系。结果表明, 沟灌条件下夏玉米棵间土壤蒸发量占全生育总耗水量的33.06%~34.35%, 棵间土壤相对蒸发强度与表层土壤含水率和作物叶面积指数之间均呈现良好的指数函数关系, 灌溉或降雨后2~3 d内土壤蒸发强度较大, 受大气蒸发力影响明显。因此, 在不影响作物蒸腾的条件下减少表层土壤的湿润面积和湿润次数是减少棵间土壤蒸发、提高作物水分利用效率的主要技术途径与措施。

关键词: 沟灌; 夏玉米; 土壤蒸发

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)11-0020-05

孙景生, 康绍忠, 王景雷, 等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发生态规律的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 20-24

Sun Jingsheng, Kang Shaozhong, Wang Jinglei, 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 with English abstract)

0 引言

农田土壤水分消耗包括棵间土壤蒸发和作物蒸腾两部分。农田节水调控的主要目的就是要通过科学的灌水方式和各种农业节水措施的实施, 减少棵间土壤蒸发的无效耗水和避免作物叶片的奢侈蒸腾。而做好此项工作的前提即是明确不同灌水方式下的棵间土壤蒸发和作物蒸腾及其二者之间的比例关系。早期研究为了获得棵间土壤蒸发与作物冠层蒸腾的观测值, 大多尝试采用表面覆盖以防止土壤蒸发, 然后比较覆盖小区的蒸发蒸腾量(ET)和未覆盖小区的ET, 以此估算棵间土壤蒸发和作物蒸腾量^[1-2]。由于这种覆盖小区的覆盖物多是由变更表面能量平衡和土壤水分的材料组成的, 故精度较差, 结果不但不能反映大田的实际情况, 而且也难以反映蒸发和蒸腾的动态过程。20世纪80年代以来, 微型蒸渗仪(Micro-Lysimeter)的发展可以在不剧烈变更田间或土壤环境条件的情况下, 使研究者能够在作物冠层下方对每天的土壤蒸发进行观测^[3]。Micro-Lysimeter是一种无扰动、封底、可移动的小型观测器皿, 安装于土壤表层, 且安装后不会破坏原来的土壤结构, 它被用于监测水分散失, 并以此作为土壤蒸发。一些研究者用Micro-Lysimeter测量了裸土和作物冠层下的土壤蒸发^[4-10], 结果表明: Micro-Lysimeter既可用于测定裸土土面蒸发, 又可用于测定作物冠层下的土壤蒸发, 如果能够经常换土, 由Micro-Lysimeter测得的土壤蒸发与其他方法(如大型称重式蒸渗仪法、水量平衡法和红外温度计法等)测得的结果吻合很好, 证明Micro-

Lysimeter是测量土壤蒸发的一种简便、实用且比较精确的有效方法。

本文研究的旨在通过采用简便、准确的测定棵间土壤蒸发的Micro-Lysimeter法, 将夏玉米不同生育阶段的耗水分割成棵间土壤蒸发与作物蒸腾两部分, 进而对棵间土壤蒸发强度与土壤含水率的关系以及棵间土壤蒸发强度与作物叶面积指数的关系进行分析, 以便为各种节水措施的实施提供一些基本依据。

1 试验处理与设计

试验于2000年6月~9月在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场的棚下测坑中进行, 测坑上口面积为2 m × 3.33 m。防雨棚在降雨之前关闭, 雨后开启, 可以有效隔绝降雨, 排除降雨对试验的影响。测坑土壤为粉沙壤土, 容重1.35 g/cm³, 田间持水量为干土重的24%。测坑前茬小麦收获后整地灭茬并起垄做沟, 沟断面为梯形(沟底宽、垄顶宽及沟深均为0.2 m), 沟长2 m, 沟间距0.6 m。供试品种为掖单13号, 6月5日点种, 株距30 cm。玉米出苗时间为6月10日, 6月20日定苗。7月初按300 kg/hm²尿素、375 kg/hm²磷酸二铵在灌水前一天追肥, 8月中旬各处理都按300 kg/hm²再追施尿素1次。9月30日收获。灌水方式为常规沟灌, 灌水控制下限设置3个水平, 分别为田间持水量的60%(L-60)、70%(L-70)和80%(L-80), 每个处理重复3次。各重复单元均在相邻两沟及垄上埋设中子管, 每5 d测定一次土壤水分, 测定深度120 cm, 每隔2~3 d用取土烘干法测定表层0~20 cm土壤含水率, 灌水后第二天加测一次。

棵间土壤蒸发用Micro-Lysimeter直接测定, Lysimeter用0.75 mm厚的镀锌铁皮卷制而成, 高10 cm, 内径有10 cm和5 cm两种, 分别置于沟中和垄上; 设有内径为11 cm和6 cm, 材料与Lysimeter相同的有

收稿日期: 2004-12-08 修订日期: 2005-04-03

基金项目: 国家科技部863计划项目(2002AA2Z4031)

作者简介: 孙景生(1963-), 男, 辽宁建平人, 研究员, 博士, 主要从事节水灌溉新技术与灌溉原理方面的研究工作。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003。Email: jshsun623@yahoo.com.cn

底外筒固定于土壤中, 以便将 Lysimeter 取出和放回时操作迅速方便, 以满足一天一次或多次称重的要求, 而不破坏周围土壤的结构。用精度为 0.1 g 的专用蒸发台秤称量, 为了保证测定精度, 使 Lysimeter 内部的土壤水分剖面与周围土壤相一致, 内部土体每日 8:00 时称重后更换。灌水日停测, 结果参照灌后第二天棵间土壤蒸发量与参考作物需水量的比值补齐。每日棵间土壤蒸发量 $(E) = (E_{沟} + E_{垄})/2$ 。

夏玉米各生育阶段的植株蒸腾量, 用水量平衡法计算得到的阶段耗水量减去同时段的棵间土壤蒸发量计算。

2 结果与分析

2.1 夏玉米各生育阶段棵间土壤蒸发量占阶段耗水量的比例

表 1 列出了沟灌条件下不同水分处理夏玉米各生育阶段的棵间土壤蒸发量及其与阶段耗水量的比例。播

种~ 出苗, 由于 3 个水分处理均是在播后的第二天灌水, 处理间土壤水分没有拉开, 因此阶段耗水量与棵间土壤蒸发量差异不大, 日平均棵间土壤蒸发量介于 3.24 ~ 3.35 mm/d 之间, 棵间土壤蒸发占阶段耗水量的 91.62% ~ 91.69% 之间。出苗~ 拔节阶段, 3 个水分处理的棵间土壤蒸发量占阶段耗水量比例明显减小, 分别为 49.14%、41.81% 和 37.61%, 植株蒸腾耗水已超过棵间土壤蒸发耗水量, 处理间植株蒸腾量差异较小, 阶段耗水量的差异主要是由棵间土壤蒸发不同造成的。玉米拔节以后, 田间耗水转向以蒸腾耗水为主, 各水分处理的棵间土壤蒸发量占阶段耗水量的比例进一步减小, 至抽雄~ 灌浆阶段, 降至最低, 介于 15.38% ~ 17.85% 之间。灌浆后随玉米的成熟, 叶片开始衰老、变黄, 植株蒸腾能力减弱, 棵间土壤蒸发占阶段耗水量的比例又上升到 32.34% 以上。从全生育期来看, 常规沟灌条件下夏玉米棵间土壤蒸发占总耗水量的 33.06% ~ 34.35% 之间。

表 1 不同水分处理夏玉米各生育阶段棵间土壤蒸发占阶段耗水量的比例

水分处理	生育阶段	播种~ 出苗	出苗~ 拔节	拔节~ 抽雄	抽雄~ 灌浆	灌浆~ 成熟	全生育期
	日期/月-日	06-05~ 06-10	06-11~ 07-05	07-06~ 08-02	08-03~ 08-15	08-16~ 09-30	06-05~ 09-30
	天数/d	6	25	28	13	46	118
L-80	E/mm	20.12	40.33	31.64	11.98	43.07	147.14
	T/mm	1.84	41.74	92.48	59.06	86.05	281.17
	ET/mm	21.96	82.07	124.12	71.04	129.12	428.31
	E/ET/%	91.62	49.14	25.49	16.86	33.36	34.35
L-70	E/mm	19.64	29.93	32.57	12.29	42.93	137.36
	T/mm	1.78	41.66	88.33	56.55	89.83	278.15
	ET/mm	21.42	71.59	120.90	68.84	132.75	415.50
	E/ET/%	91.68	41.81	26.94	17.85	32.34	33.06
L-60	E/mm	19.42	24.38	22.94	8.74	40.96	116.44
	T/mm	1.76	40.45	71.91	48.08	65.96	228.16
	ET/mm	21.18	64.83	94.85	56.82	106.92	344.60
	E/ET/%	91.69	37.61	24.19	15.38	38.31	33.79

2.2 棵间土壤蒸发强度与表层土壤含水率的关系

为了消除气象因素的影响, 图 1 和图 2 分别给出了当叶面积指数 $LA I < 1.0$ 和 $LA I > 3.0$ 时实测的沟中相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 (其中 ET_0 —参考作物需水量, mm) 与表层 20 cm 土壤重量含水率的关系。从图 1 和图 2 中可以看出, E/ET_0 随表层土壤含水率的变化趋势相同, 均先是随土壤含水率的增加而线性增加, 当表层土壤含水率介于 12% ~ 16% 时, E/ET_0 随土壤含水率增加而增大的速率减小; 当表层土壤含水率介于 16% ~ 20% 之间时, E/ET_0 又随土壤含水率的增加而迅速增大; 当表层土壤含水率大于 20% 时, E/ET_0 随土壤含水率的增加基本上呈水平直线变化。这一结果说明, 当表层土壤含水率大于 20% 时, 棵间土壤蒸发主要受大气蒸发力控制, 处在棵间土壤蒸发的第一阶段; 当表层土壤含水率介于 12% ~ 20% 时, 棵间土壤蒸发处在蒸发速率的递减阶段, 主要受制于土壤湿度和土壤导水率的大小; 当土壤含水率低于 12% 时, 棵间土壤蒸发即

快速地进入扩散控制阶段。

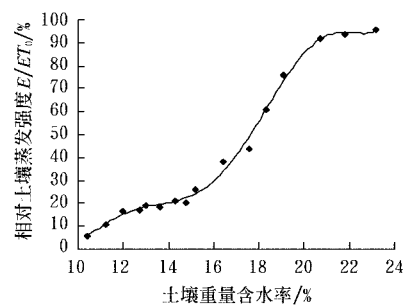


图 1 相对土壤蒸发强度与表层土壤含水率的关系 ($LA I < 1.0$)

Fig 1 Relationship between relative soil evaporation intensity and soil water content ($LA I < 1.0$)

从图 1 和图 2 还可以看出, 当叶面积指数 $LA I$ 较小时, 夏玉米田相对棵间土壤蒸发强度明显地高于 $LA I$ 较大的情况, 且在蒸发递减阶段随表层土壤含水率的

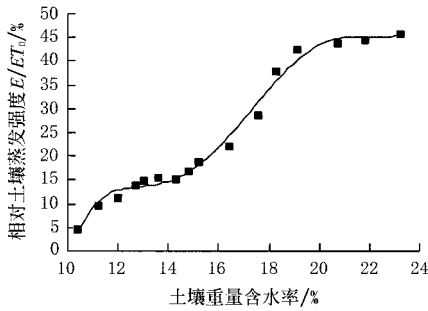


图2 相对土壤蒸发强度与表层土壤含水率的关系 (LAI > 3.0)

Fig. 2 Relationship between relative soil evaporation intensity and soil water content (LAI > 3.0)

降低而下降的速率非常快,表明夏玉米田在地表覆盖度较低时,由于土壤表面接受的太阳净辐射较多,表墒失水较快;而当 LAI 较大时,由于冠层对净辐射的截留,加之作物冠层内的空气相对湿度较高,表层失水速率相对较慢,低的棵间土壤蒸发速率可使蒸发第二阶段的递减曲线变化平缓一些。根据观测结果,当表层土壤重量含水率低于 10% 时,棵间土壤蒸发强度接近于零,与 LAI 的大小关系不大。

根据沟中棵间土壤蒸发的观测结果,对棵间蒸发速率递减阶段(即土壤重量含水率介于 12% ~ 20% 之间)的相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 与表层土壤重量含水率的关系进行了回归分析发现, E/ET_0 与表层土壤含水率之间的关系呈指数函数关系,结果见公式(1)和公式(2)。

$$E/ET_0 = 0.7822e^{0.2343\theta}, R^2 = 0.9576, \text{ 当 } LAI < 1.0 \text{ 时} \quad (1)$$

$$E/ET_0 = 1.3090e^{0.1784\theta}, R^2 = 0.9572, \text{ 当 } LAI > 3.0 \text{ 时} \quad (2)$$

式中 E/ET_0 ——相对棵间土壤蒸发强度,%; θ ——表层 20 cm 土层的土壤重量含水率(占干土重的%),%。

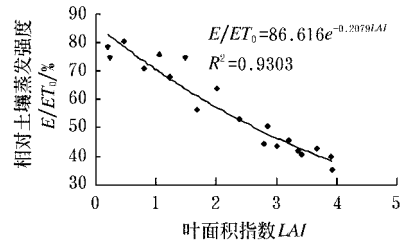
2.3 棵间土壤蒸发强度与叶面积指数的关系

为了消除土壤水分和气象因素的影响,根据实测资料从中选取表层 20 cm 土层土壤含水率介于 19.5% ~ 21.5% 之间的棵间蒸发的观测结果,绘出了相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 与实测的夏玉米叶面积指数 (LAI) 的关系,结果见图 3。由图 3 可见,相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 随着叶面积指数 LAI 的增加而显著减小,二者之间的关系呈现指数函数的形式,回归关系式为

$$E/ET_0 = 86.616e^{-0.2079LAI}, R^2 = 0.9303, \text{ 当 } 19.5\% < \theta < 21.5\% \text{ 时} \quad (3)$$

式中 E/ET_0 ——相对棵间土壤蒸发强度,%; LAI——叶面积指数。

从图 3 的回归曲线可以看出,当 $LAI < 3.0$ 时,相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 随 LAI 的增加而减小的比较快;当 $LAI > 3.0$ 时,曲线变为平缓, E/ET_0 随 LAI 增加而减小的速率变慢。



注:表层 20 cm 土壤重量含水率介于 19.5% ~ 21.5% 之间

图3 相对土面蒸发强度与叶面积指数的关系

Fig. 3 Relationship between relative soil evaporation intensity and leaf area index

Brisson 等(1992)^[11]提出的棵间蒸发与作物蒸发蒸腾的比例关系式为:

$$E_p/ET_p = \exp(-\delta LAI)$$

式中 δ ——冠层削光系数; E_p, ET_p ——分别为潜在土壤蒸发和潜在蒸腾量,mm。

康绍忠等人(1995)^[12]依据波文比—能量平衡法推导出了可以计算棵间蒸发与农田蒸发蒸腾比例关系日变化的一个类似形式的公式。可以看出,此处用参考作物蒸腾量 ET_0 代替作物潜在蒸腾量 ET_p ,也得到了基本相同的结果,差别仅是公式右边多了一个常数系数,因此在缺乏大型蒸渗仪不能对每天农田蒸腾量进行观测的情况下,用 ET_0 代替 ET_p 建立相对棵间土壤蒸发强度与叶面积指数的关系是一种消除气象因素影响的较好方法。

2.4 灌溉后湿沟棵间土壤蒸发强度的变化过程

图 4 给出了夏玉米苗期灌溉后棵间土壤蒸发强度 E, ET_0 及相对棵间土壤蒸发强度 E/ET_0 的变化。从图 4 中可以看出,在灌后 3 d 湿沟棵间土壤蒸发量较大, E 与 ET_0 的差距较小,相对棵间土壤蒸发强度在 72% 以上,且受大气蒸发力的影响比较明显,这可以看作是蒸发的第一阶段;灌后第 4 天至第 6 天,棵间土壤蒸发强度急速下降,第 7 天又有所增加,此后几天棵间土壤蒸发强度一直维持在 1.0 mm/d 以下,且随时间延长还有继续

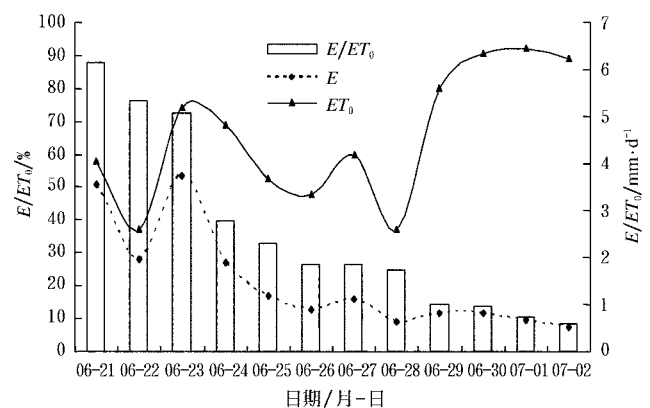


图4 灌溉后土壤蒸发变化过程

Fig. 4 Change course of soil evaporation after an irrigation

减少的趋势, 这可以看作是蒸发的第二阶段, 在该阶段的前期棵间土壤蒸发强度虽然主要受土壤水分的限制, 随表层土壤变干蒸发迅速减少, 但大气蒸发力对棵间土壤蒸发的影响仍然比较明显, 但到了该阶段的后期, 棵间土壤蒸发受大气蒸发力的影响已非常小, 这一结果比较有代表性, 可以说明夏玉米生育期期间蒸发的变化情况, 即只要有灌水, 在灌水后2~3 d以内的棵间土壤蒸发就比较大, 因此, 为达到节水的目的, 灌溉实施中应提倡局部湿润的大定额灌溉, 尽量减少表面湿润的面积和缩短土壤表面湿润的时期。

3 结论与讨论

不同沟灌方式及不同水分处理对夏玉米田棵间土壤蒸发、植株蒸腾和农田总耗水量均会产生比较明显的影响^[13]。试验研究结果表明, 采用常规沟灌的灌水方式, 夏玉米生育期总耗水量约为420 mm左右, 其中的33.06%~34.35%为棵间土壤蒸发量, 不参与作物产量的形成。夏玉米田相对土壤蒸发强度的高低主要受冠层下方表层土壤含水率和地表覆盖度(即叶面积指数)二者的共同影响, 在叶面积指数一定的条件下, 表层土壤含水率愈低, 相对土壤蒸发强度也就愈小, 随着表层土壤含水率的增大, 相对土壤蒸发强度呈指数函数曲线的形式上升; 而当表层土壤含水率介于19.5%~21.5%之间时, 夏玉米生育期相对土壤蒸发强度的大小主要受叶面积指数大小的影响, 即随着叶面积指数的增加, 相对土壤蒸发强度呈指数函数曲线的形式下降。因此, 在生产实践中, 可以采取适应性的措施, 如增加作物生长早期的叶面积指数和减少冠层下方的表层土壤含水率, 以控制农田水分的非生产性消耗, 这与刘昌明等人^[9]的结论一致。

试验研究结果同时表明, 夏玉米田的棵间土壤蒸发主要发生在灌水后或降雨后几天表层土壤比较湿润的时期内, 因此, 在不影响作物蒸腾的条件下减少表层土壤的湿润面积是减少棵间土壤蒸发的一种主要措施。在生产实际中, 这可以通过尝试采用控制性交替隔沟灌溉技术的方法来实现。控制性交替隔沟灌溉技术之所以省水, 主要原因是每次灌水仅湿润一半左右的土壤表面, 不仅可以有效地减少棵间土壤蒸发耗水, 而且在一定程度上也较好地控制了作物奢侈蒸腾的发生, 使作物的水分利用效率得以明显提高^[14]。另外, 对于不同的气候类型区, 如采用常规沟灌的方式供水, 可探索采用不同的灌水定额, 补充灌溉类型区可采用较小的灌水定额, 而干旱地区则应加大每次的灌水定额, 尽量减少灌水次数, 缩短土壤表面的湿润次数和时间。

需要补充说明的是, 本研究是在防雨棚下的测坑进行的, 播前底墒较差, 夏玉米生育期灌水定额较小, 灌水次数偏多, 因此得到的棵间土壤蒸发量可能偏高一些;

另外, 制作棵间蒸发皿的材料、尺寸及封底可能对测定的棵间土壤蒸发结果均会产生影响, 本研究因受试验条件限制未对其实测值的可靠性进行验证, 这些均有待日后进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] Ham J M, Heimann J L, Lascano R J. Determination of soil water evaporation from energy balance and stem flow measurements[J]. *Agric For Meteorol*, 1990, 52: 287-301.
- [2] Walker G K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies[J]. *Journal of Soil Science*, 1983, 63: 137-141.
- [3] Boast C W, Robertson T M. A microlysimeter method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 689-696.
- [4] Walker G K. Evaporation from wet soil surface beneath plant canopies[J]. *Agric For Meteorol*, 1984, 33: 259-264.
- [5] Lascano R J, Van Bavel C H M. Experimental verification of a model to predict soil moisture and temperature profiles[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, 47: 441-448.
- [6] Cooper P J M, Keatinge J D H, Hughes G. Crop evapotranspiration—a technique for calculating its components by field measurements[J]. *Field Crop Research*, 1983, 7: 299-312.
- [7] Matthias A D, Salehi R, Warrick A W. Bare soil evaporation near a surface point source emitter[J]. *Agric Water Manage*, 1986, 11: 257-277.
- [8] Allen S J. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria[J]. *Agric For Meteorol*, 1990, 49: 291-309.
- [9] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. *水利学报*, 1998, (10): 36-39.
- [10] 刘 钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. *水利学报*, 1999, (6): 45-50.
- [11] Brisson N, Seguin B, Bertuzzi P. A meteorological soil water balance for crop simulation models[J]. *Agric For Meteorol*, 1992, (59): 267-278.
- [12] 康绍忠, 张富仓, 刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J]. *水科学进展*, 1995, 6(4): 285-289.
- [13] 孙景生. 控制性交替隔沟灌溉的水分利用特性与节水机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 2002.
- [14] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 交替隔沟灌溉提高农田水分利用效率的节水机理研究[J]. *水利学报*, 2002, (3): 64-68.

Experiment on soil evaporation of summer maize under furrow irrigation condition

Sun Jingsheng¹, Kang Shaozhong², Wang Jinglei¹, Li Xiaodong¹, Song Ni¹

(1. *Fam land Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China;*

2. *Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

Abstract: Soil evaporation is an important component of water consumption in farmland. In this paper, the soil evaporation in field ditch and on ridge was measured by using two kinds of micro-lysimeters respectively, the change law of soil evaporation and crop transpiration in summer maize under furrow irrigation was studied, and the relationship between relative soil evaporation intensity and soil water content as well as the relationship between soil evaporation intensity and leaf area index was analyzed. The results showed that soil evaporation in summer maize field under furrow irrigation condition accounted for 33.06% ~ 34.35% of water consumption in the whole growth period, and there was a good exponential function relationship between relative soil evaporation intensity and surface soil water content as well as leaf area index. Soil evaporation intensity was comparatively great within 2~3 days after an irrigation or rainfall, and it was influenced by atmosphere evaporation intensity obviously. Therefore, to reduce wetting area and wetting times of surface soil is the major technical way and measure to decrease soil evaporation and to raise crop water use efficiency if crop transpiration is not influenced.

Key words: furrow irrigation; summer maize; soil evaporation