

黄土塬区麦田蒸散特征*

甘卓亭^{1,2} 刘文兆^{1,3,*}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; ²中国科学院研究生院, 北京 100039; ³西北农林科技大学, 陕西杨陵 712100)

【摘要】 利用大型称重式蒸渗仪研究了黄土塬区冬小麦不同时段单元(生育期、月、日、时)的蒸散特征,并分析了叶面积指数、土壤含水量和气温、降水等因子对蒸散的影响.结果表明,在试验年份,各生育期内冬小麦的日蒸散量:孕穗-抽穗期>开花期>起身期>拔节期>灌浆期>返青期>成熟期>越冬期;生长前期蒸散受温度影响较大,中期受叶面积指数影响较大,后期土壤水分成为蒸散的限制因子,灌浆期内冬小麦日均蒸散量因受土壤水分亏缺影响而显著下降,日均蒸散量从孕穗-抽穗期的 $6.25\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 减小到灌浆期的 $2.66\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;月蒸散以4~6月最高,3个月蒸散量占试验期间总蒸散量的80%以上;麦田逐日蒸散变化曲线上的波动峰值反映了受降水作用土壤水分状况改善条件下的蒸散特征;时蒸散过程在总体遵循周期性的前提下表现出随天气而改变的现象.

关键词 大型蒸渗仪 蒸散 冬小麦 土壤水分 黄土高原

文章编号 1001-9332(2006)06-1435-04 中图分类号 S161.4 文献标识码 A

Evapotranspiration of winter wheat field on Loess Plateau tableland GAN Zhuoting^{1,2}, LIU Wenzhao^{1,3}
(¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ³Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(8): 1435~1438

This paper measured the evapotranspiration (ET) rate of a winter wheat field on the Loess Plateau tableland by using large-scale weighing lysimeter and analyzed the effects of wheat leaf area index (LAI), soil water content, air temperature, and rainfall on the ET at the time scales of growth stage, month, day, and hour. The results showed that the mean daily ET rate in different growth stages was in the order of booting-heading > flowering > erecting > jointing > filling > reviving > ripening > overwintering. Air temperature had a larger effect in initial stage, LAI was in mid stage, and soil water content was in last stage in the experimental year. The mean daily ET rate was markedly decreased from $6.25\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ at booting-heading stage to $2.66\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ at grain-filling stage due to soil water deficit. The monthly ET rate in April, May and June was higher than that in other months, and the ET amount of the three months accounted for 80% of the total during the experimental period. The apices of daily ET curve mainly reflected the effects of rainfall, and the hourly ET process basically reflected the ET changes with weather conditions.

Key words Large-scale lysimeter, Evapotranspiration, Winter wheat, Soil water, Loess Plateau

1 引 言

对于旱作农业,如何在现有水分条件下提高水分利用效率是人们普遍关心的问题.旱作农业亦称雨养农业,其水源是唯一的,只有天然降水^[7],而降水的年内、年际分配不均所造成的水分供需矛盾是该地区农业生产的首要问题^[3,8,10,11,13].旱作农田的水分逸出以蒸散耗水为主,因而研究旱作农田蒸散特征,了解蒸散动态过程,将有助于水分利用效率的研究.国内外采用的计算蒸散的方法很多,但需要对其结果进行适当校正.由于蒸渗仪测定蒸散的精度较高(一般可达 $0.1\sim 0.02\text{ mm}$),因而该仪器已经成为测定蒸散的标准试验仪器^[4,9~13],可用于校正

和比较其它方法所获得的数据^[14].尽管蒸渗仪内外在热量和水分方面存在差异,如在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层地温的资料显示,器内比器外高约 5.4% ,但其在蒸散规律、蒸散过程上对周围农田有较好的代表性^[1,2].

自20世纪90年代以来,人们利用蒸渗仪进行了大量蒸散测定试验,但是针对黄土塬区农田蒸散的研究却未见报道.本试验以黄土高原长武农业生态试验站的蒸渗仪实测数据和中子仪法测定的土壤水分含量为基础,结合气象资料,就该地区的冬小麦

* 国家重点基础研究计划项目(2005CB121106)和国家自然科学基金资助项目(90202011).

** 通讯联系人. E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

2005-07-29收稿, 2006-06-14接受.

实际蒸散过程按不同时段单元进行分析,探求其作物因素、土壤水分和气象因素与蒸散之间的关系,以期为黄土塬区农田水分管理提供依据,并为发展高效节水农业提供参考。

2 材料与方法

2.1 自然概况

试验设在中国科学院长武农业生态试验站综合试验场内(107°42'E, 35°16'N, 海拔 1200 m)。该区地带性土壤为黑垆土,其质地均匀、疏松。年平均降水量为 584 mm, 7~9 月降水占年降水量的 55%, 年均温 9.1°C, 无霜期 171 d。地下水埋深 50~80 m, 属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 既是典型的旱作农业区又是典型的高原沟壑区, 小麦和玉米为本区的主要粮食作物。长武站蒸渗仪是一种大型原状土自动称重渗漏式蒸渗仪, 体积为 2 m × 1.5 m × 3 m (长 × 宽 × 高), 土体高度 2.6 m, 中心处装有 2.2 m 深中子管, 始建于 1994 年, 2003 年对称重系统和数据采集系统进行了改进。改进后的重量分辨率为 150 g, 相当于 0.05 mm 厚度水量, 数据由计算机自动采集。蒸渗仪内种植的作物与周围的大田多年保持一致。

2.2 研究方法

供试冬小麦品种为 89134, 2003 年 9 月 26 日播种, 2004 年 6 月 28 日收获。冬小麦的实际蒸散利用蒸渗仪从越冬期开始监测; 蒸渗仪内的土壤水分利用中子仪监测, 每 5~10 d 测定 1 次, 测定深度 2 m, 1 m 以上间隔 10 cm, 1 m 以下间隔 20 cm。气象资料取自蒸渗仪正西 20 m 处气象观测场。

在测量蒸渗仪内土壤水分时, 为防止人及中子仪的重量对蒸渗仪称重系统的干扰, 设计制作了 1 个长 1.6 m、高 0.8 m、宽 0.5 m 的铁架, 铁架中部有悬挂于铁架横档的活动托架(可通过上端螺母控制活动托架底部与地面距离), 测量时, 将铁架脚支于蒸渗仪外, 中子仪置于托架上, 调整上端螺母到适合中子仪测量的位置, 测量完毕, 将铁架移开。

在每个生育期内用 CF203 型叶面积仪测定小麦叶面积, 每次调查 3 个样方(50 cm × 50 cm), 在每个样方内随机抽取 50 茎测定小麦叶面积, 并同时调查样方内小麦总茎数, 然后换算成叶面积指数。

3 结果与分析

3.1 冬小麦生育期的蒸散特征

由图 1 可以看出, 日蒸散量在各生育期的大小顺序为: 孕穗-抽穗期 > 开花期 > 起身期 > 拔节期 > 灌浆期 > 返青期 > 成熟期 > 越冬期。从 2003 年 11 月 20 日至 2004 年 3 月 10 日为冬小麦的越冬期, 在越冬期内日蒸散量较低, 仅为 $0.55 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。尽管在越冬期土壤含水量较高, 为 25% (v/v) 左右, 但由于叶面积指数小于 0.5, 小麦的蒸腾耗水量小。另外, 整个越冬期的气温均较低, 日均温为 $0.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 日

均最高气温为 $6.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 日均最低气温为 $-4.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 因而从整体上看, 其日均蒸散量较小。在越冬前期气温稍高, 日蒸散量高于平均值; 越冬期中期气温在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 表层土壤封冻, 日蒸散速率相对较低; 后期气温逐步回升, 土温升高, 土壤开始解冻, 蒸散量逐渐增大。3 月 10 日至 4 月 2 日为返青期, 该期历时较短(23 d), 尽管日平均蒸散量 ($1.88 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 比越冬期 ($0.55 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 高, 但总蒸散量 (43.2 mm) 小于越冬期 (54.3 mm)。这是由于在小麦返青期, 气温回升较快, 尽管小麦叶面积指数不高, 但由于土壤含水量高, 土壤蒸发大, 因而实际蒸散大。返青期以后随气温上升, 日蒸散速率也呈现上升趋势, 从起身期 ($4.63 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 经拔节期 ($4.65 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 到孕穗-抽穗期 ($6.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 达最大值, 而从起身期到孕穗-抽穗期土壤平均含水量下降了 5%。在起身期, 由于经过返青期的蒸散耗水, 土壤蒸发因土壤含水量降低而减小, 但此时小麦的叶面积指数升高较快, 蒸腾耗水量迅速增大, 弥补了土壤蒸发量的减小, 因而农田蒸散仍然维持在较高的水平。随后, 冬小麦的叶面积指数不断上升, 土壤含水量逐步下降, 前者导致农田蒸散增大, 而后者则致使农田蒸散减小, 使日蒸散量的变动较小。从开花期开始日蒸散量逐渐下降, 特别是在灌浆期日蒸散量仅为 $2.66 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。根据刘昌明等^[6]在栾城试验站对供水充足的冬小麦田间蒸散的研究表明, 灌浆期是冬小麦的耗水高峰期之一, 其日蒸散量较高, 而本区灌浆期日蒸散量偏低。究其原因, 是由于该地区 2 m 土层实际无效水量在 265 mm 左右, 而试验中灌浆期土壤含水量仅为 14.2%, 也即 2 m 土层平均储水量为 284 mm, 整个灌浆期 2 m 土层储水量的变幅为 327~267 mm, 接近实际无效水量, 因而小麦蒸腾作用受到抑制, 从而导致日蒸散量降低。这一结论与李玉山等^[5]在 1986~1989 年 6 月份实测结果基本一致。

小麦前期和后期日蒸散量较低, 是因为前期植株较小, 蒸散以棵间蒸发为主, 尽管麦田底墒好, 但气温较低, 因而日蒸散量较低; 后期生命活动趋于完成, 再加上其前的蒸发和蒸腾耗水, 水分亏缺严重, 土壤含水量极低, 因而日蒸散量较低。起身-抽穗期是营养生长最旺盛的时期, 随小麦生长, 棵间蒸发逐步降低, 但小麦的蒸腾耗水迅速增大, 且同期有较高的土壤含水量可以满足蒸腾需要, 因而蒸散达到高峰。开花期为小麦生命活动最旺盛的时期, 但由于水分不能充分供给, 致使该期日蒸散量较前期有所下降。灌浆期需要大量的水分来积累和转运干物质, 耗

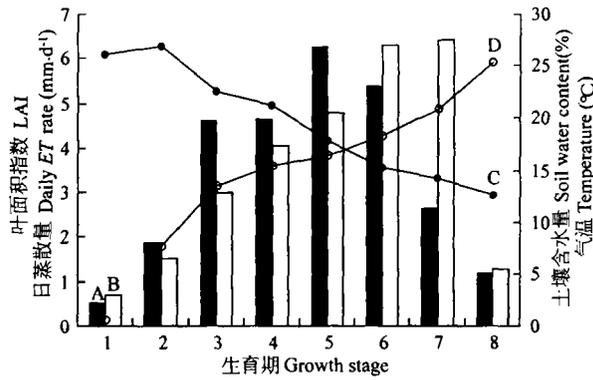


图 1 冬小麦各生育期日均实际蒸散量、平均土壤含水量、叶面积指数和日均温

Fig. 1 Daily ET, mean soil water content, mean daily temperature and LAI during growth stages of winter wheat

A: 日蒸散量 Daily evapotranspiration rate; B: 叶面积指数 LAI; C: 土壤含水量 Soil water content; D: 气温 Air temperature 1) 越冬期 Overwintering period, 2) 返青期 Reviving period, 3) 起身期 Erecting period, 4) 拔节期 Jointing period, 5) 孕穗-抽穗期 Booting-heading period, 6) 开花期 Flowering period, 7) 灌浆期 Filling period, 8) 成熟期 Ripening period

水强度较高, 但此时土壤水分接近实际无效水量, 水分供给成为影响该阶段蒸散的主要因子.

3.2 冬小麦月蒸散特征

由图 2 可以看出, 4~6 月的蒸散耗水量较高, 累计蒸散量达 398 mm, 占越冬期以后总蒸散量的 80% 以上, 4、5、6 月分别占 30%、35% 和 17%; 12 月至翌年 3 月相对较低, 总蒸散量为 86 mm, 仅占 20%, 其中 1 月月蒸散量仅为 7 mm, 而 12 月也只有 11 mm, 这是因为这两个月的月均温在 0 °C 以下, 土壤表层已经封冻, 2、3 月蒸散量逐月上升, 分别为 20 mm 和 48 mm. 从总体上看, 12 月和 1 月属于“低蒸散期”, 而 4~6 月属于“高蒸散期”, 2 月和 3 月则是蒸散“过渡期”. 作为旱作农业区, 小麦实际蒸散耗水源于降水量与前期土壤蓄水^[5], 从图 2 可知, 两者依月份不同而异. 12 月至翌年 2 月降水供水和土壤供水所占比例相当, 降水供水稍高于土壤供水, 在 50%~60% 之间; 3 月蒸散耗水增大, 降水供水下降到 31%, 耗水主要来自土壤供水; 4 月由于降雨量低且正值蒸散耗水高峰期, 所以该月降水供水仅占 4%; 5、6 月降水相当, 但由于 5 月还处在蒸散耗水高峰期, 耗水仍以土壤供水为主, 而 6 月蒸散耗水下降, 降水供水的比例上升. 从整体上看, 降水供水为 118 mm, 仅占总蒸散耗水的 24%, 蒸散耗水以土壤供水为主. 从各月看, 3~5 月蒸散耗水以土壤供水为主, 其余月份两者基本相当.

3.3 冬小麦日蒸散特征

由图 3 可以看出, 监测从 11 月 25 日开始到 12

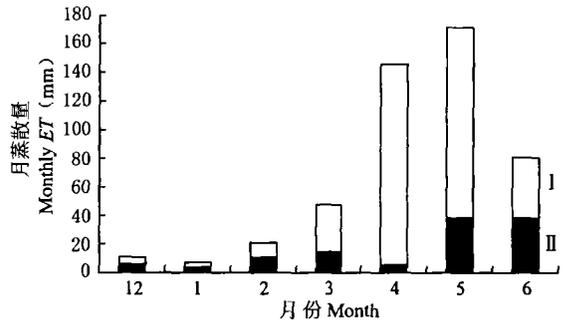


图 2 冬小麦月蒸散量及其组成

Fig. 2 Monthly ET composition of winter wheat I. 土壤水 Soil water II. 降雨量 Precipitation

月上旬, 日蒸散量一般在 0.5 mm 以上; 12 月中旬到 2 月中旬, 日蒸散量较低, 一般在 0.5 mm 以下; 2 月中旬以后, 日蒸散量总体呈上升趋势; 6 月上旬以后, 日蒸散量逐步下降. 累计蒸散量前期较为平缓, 后期上升较快, 试验期间的累计蒸散量为 491 mm. 对日蒸散曲线上峰值点和降雨日的比较发现, 在次降雨或连续阴雨之后一定时段内均相应出现一个蒸散峰值点, 例如 5 月 7 日蒸散峰值点是在 5 月初的连续 6 d 阴雨之后出现. 由于降雨后在土壤中形成了短时段充分供水, 因此可以认为逐日蒸散变化曲线上的波动峰值反映了受降水作用土壤水分状况改善条件下的蒸散特征.

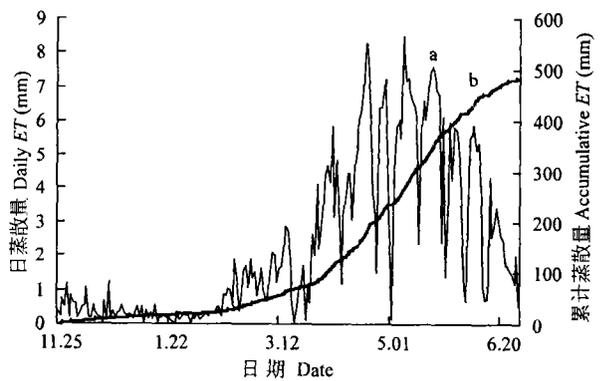


图 3 冬小麦逐日蒸散 (a) 和累计蒸散 (b) 曲线

Fig. 3 Daily ET (a) and accumulative ET (b) of winter wheat

3.4 冬小麦的时蒸散特征

时蒸散特征可以从微观角度理解蒸散的动态过程, 是定量研究蒸散的基础. 由于受到仪器精度的限制, 以往这方面的研究多限于理论上的推导. 对时蒸散过程的总体分析发现, 时蒸散具有在总体遵循周期性的前提下表现出随天气而改变的现象. 本文从“高蒸散期”、“过渡期”和“低蒸散期”中分别选取连续 2 个阴天和 2 个晴天进行说明 (图 4). 从中可以看出, 尽管晴天的时蒸散日变化波形也受到气象

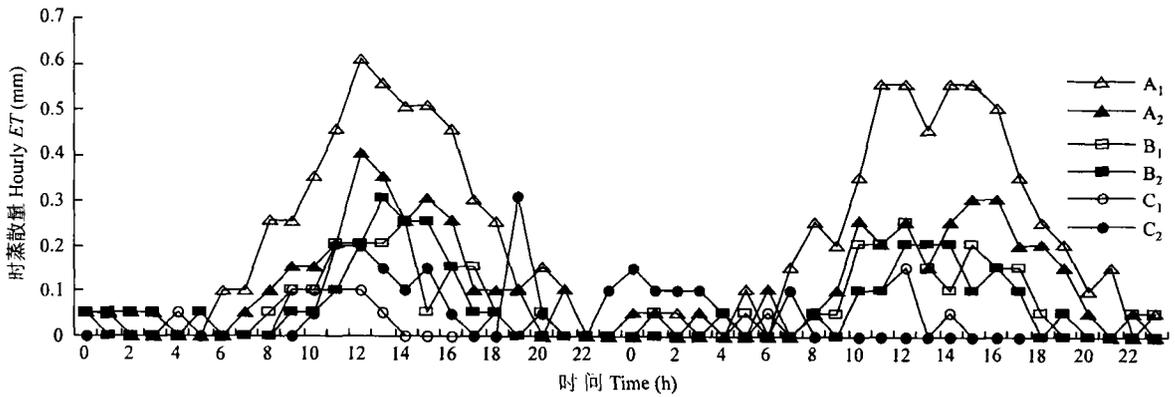


图 4 不同时间的冬小麦时蒸散量

Fig. 4 Hourly ET of winter wheat in different period

A: 高蒸散期 Fastigium period B: 过渡期 Transition period C: 低蒸散期 Offpeak period 1)晴天 Sunny days 2)阴天 Cloudy days

因子的扰动,但总体上看较阴天显著。“过渡期”晴天时蒸散的日变化一般从 8:00 开始增大,午间达到最大值,随后逐渐减小,18:00 以后一般为 0.05 mm 左右;而“高蒸散期”的晴天一般从 6:00 开始增大,最大值仍在午间出现,21:00 以后一般在 0.05 mm 左右,“低蒸散期”的晴天一般从 9:00 增大,14:00 ~ 15:00 以后降为 0.05 mm 左右,最大值出现时间较前两者提前 1 h 左右。从总体上看,阴天的时蒸散日变化仍然存在,但是不同蒸散时期的“抗扰”能力不一,相对而言,“低蒸散期”最差,其波形最易受到破坏。阴天的午间蒸散仍然较高。

4 结 论

根据 2003~2004 年黄土塬区大型称重式蒸渗仪的麦田蒸散测定结果,结合冬小麦的叶面积指数、土壤含水量和气温、降水等因子,分别对黄土塬区冬小麦地的生育期蒸散、月蒸散、日蒸散和时蒸散进行了分析研究。就生育期蒸散而言,灌浆期内冬小麦日均蒸散量因受土壤水分亏缺影响显著下降,日均蒸散量从孕穗抽穗期的 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 减小到灌浆期的 $2.66 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。就月蒸散而言,可以认为 4~6 月为试验期间的“高蒸散期”,2 月和 3 月为“过渡期”,12 月和 1 月为“低蒸散期”。麦田逐日蒸散变化曲线上的波动峰值反映了受降水作用土壤水分状况改善条件下的蒸散特征。时蒸散过程在总体遵循周期性的前提下表现出随天气而改变的现象。日蒸散和时蒸散特征有助于对蒸散机理的理解。

参考文献

- 1 Chen J-Y (陈建耀), Liu C-M (刘昌明), Wu K (吴凯). 1999. Evapotranspiration of soil-plant-atmospheric continuum—A simulation study with lysimeter. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **10**(1): 45~48 (in Chinese)

- 2 Chen J-Y (陈建耀), Wu K (吴凯). 1997. The impacts of groundwater on evapotranspiration by using lysimeter. *Acta Geogr Sin (地理学报)*, **52**(5): 439~446 (in Chinese)
- 3 Fan Z-P (范志平), Zeng D-H (曾德慧), Jiang F-Q (姜凤岐). 2001. Application of sustainable and intensive management model of windbreaks/shelterbelts. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **12**(6): 811~814 (in Chinese)
- 4 Howell TA, Schneider AD, Jensen ME. 1991. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurement. In: Allen RG, Howell TA, Pruitt WO, eds. *Proceedings of the International Symposium on Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*. Honolulu, HI: IRDI/ASAE, 1~9
- 5 Li Y-S (李玉山), Su S-M (苏陕民). 1991. Efficient Ecological and Economic System in Wangdong Watershed of Changwu County. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House (in Chinese)
- 6 Liu C-M (刘昌明), Zhang X-Y (张喜英), You M-Z (由懋正). 1998. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large scale weighing lysimeter and micro lysimeter. *Acta Hydraul Eng (水利学报)*, (10): 36~39 (in Chinese)
- 7 Liu W-Z (刘文兆), Li Y-S (李玉山). 1992. Theory and practice of water saving agriculture on the Loess Plateau. *J Soil Water Conserv (水土保持学报)*, **6**(1): 1~6 (in Chinese)
- 8 Liu X-Z (刘贤赵), Yi H-P (衣华鹏), Li S-T (李世泰). 2004. Soil moisture characteristics of apple planting subarea in WeiBei dry highland, Shaanxi Province. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(11): 2055~2060 (in Chinese)
- 9 Pnueger H, Hatfield JL, Aase K, et al. 1997. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. *Agron J*, **89**: 730~736
- 10 Wang J-X (王进鑫), Liu B-Z (刘秉正), Gao B-S (高保山), et al. 2000. Study on water requirement and limited irrigation effects of dwarfing Fuji apple tree on WeiBei of Loess Plateau. *Res Soil Water Conserv (水土保持研究)*, **7**(1): 69~74 (in Chinese)
- 11 Wei Q-P (魏钦平), Cheng S-H (程述汉), Tang F (唐芳), et al. 1999. Relationship between fruit quality of Fuji apple and meteorological factors. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **10**(3): 289~292 (in Chinese)
- 12 Young MH, Wierenga PJ, Mancino CF. 1997. Monitoring near surface soil water storage in Turfgrass using time domain reflectometry and weighing lysimeter. *Soil Sci Soc Am J*, **61**: 1138~1146
- 13 Zhao Z (赵忠), Li P (李鹏), Wang N-J (王乃江). 2000. Distribution pattern of root systems of main planting trees species in WeiBei Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **11**(1): 37~39 (in Chinese)
- 14 Zu D-K (左大康), Xie X-Q (谢贤群). 1991. Study on Evapotranspiration in Agricultural Lands. Beijing: China Meteorological Press, 71~79 (in Chinese)

作者简介 甘卓亭,男,1973年生,博士研究生。主要从事流域水文生态和节水农业研究,发表论文 2 篇。E-mail: zgtan73@126.com

责任编辑 张凤丽