

黑龙港地区夏玉米生长期综合 ET 试验研究

李 玮, 陈根发, 刘家宏, 卢 路, 秦大庸

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 为了研究人类活动影响下流域二元水循环中农作物耗水通量特征, 在华北平原黑龙港地区夏玉米生长期, 使用 FDR 与中子仪对土壤表层和剖面含水率分别进行了田间测量, 对玉米的不同生长阶段特性、生长期降雨以及土壤含水率的变化进行了分析。并以此为基础, 对玉米苗期, 拔节, 抽雄, 灌浆等各生长阶段利用水量平衡法进行了蒸散发量(ET)计算和分析。结果表明: 玉米生长期内的总蒸散量为 383.0 mm, 各生长阶段日均 ET 分别为 1.2, 3.6, 5.7, 6.5, 2.8, 1.8 mm/d。ET 在不同生长时期与叶面积指数成明显的线形相关关系, 最高叶面积指数为 5.693, 玉米生长期平均蒸散系数为 0.62。该结果可为研究强人类活动下的“二元”水循环过程的蒸发通量提供依据。

关键词: 夏玉米; 土壤含水率; 蒸散发; 黑龙港

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)05-0128-05

随着人类活动的加剧, 社会水循环已经成为影响整个水循环过程的重要因子, 由此形成了“自然-人工”的二元水循环过程^[1]。蒸发是水循环过程中的重要部分, 大规模的农业活动大大的改变了自然条件下的蒸发过程, 要摸清“自然-人工”相互作用下的二元水循环过程, 就必须要对水循环中的各项通量进行研究。本试验研究以摸清蒸发过程为目的, 测定在强人类农业活动下的蒸散发量。另一方面, 研究特定区域作物生长期蒸散发量的变化过程对当地农作物田间用水调配, 实现从用水管理到耗水管理, 具有重要意义^[2]。

植被蒸腾是陆地生态系统“土壤-植被-大气”循环过程中一个极为重要的环节, 如何确定作物的生长期耗水, 成为二元水循环研究的重点之一。前人在植被蒸散发计算方法和土壤水分对植被蒸散发的影响方面均有研究^[3,4], 但植被的蒸散发特性具有强烈的时间和地域特征, 对不同地区, 不同自然条件下的作物进行耗水研究是非常重要的。夏玉米是我国北方地区主要粮食作物之一, 研究夏玉米生长过程中的总耗水量, 有利于摸清我国北方农业地区二元水循环过程的耗水通量。目前, 植被蒸散发量的确定方法主要常用的有水量平衡法, 能量平衡法, 蒸渗仪法, 公式计算法(Penman-Monteith 公式, TURC 公式等), 模型模拟方法等^[5-7], 而水量平衡法是蒸散发量确定最为基本和精确的方法, 常作为验证其他方法准确性的依据^[8,9]。其他类似区域的相关试验研究结果显示玉米生长期总蒸散发量在

356 ~ 448 mm 之间^[10-13]。

1 试验设计

试验地点为河北省农林科学院旱作农业研究所, 地处河北省衡水市护驾迟镇, 地理位置东经 115.7°, 北纬 37.9°, 包括四块 72 m² 的试验区。衡水市地处华北平原黑龙港地区, 属半干旱大陆季风气候区, 年平均气温 12.6℃, 多年平均降水量 509.7 mm, 降水主要集中在夏季, 无霜期为 200 d 左右。土壤类型主要为潮土, 土层深厚, 以轻壤土为主, 部分为砂质和粘质, 土壤矿物养分丰富。玉米为衡水地区主要农作物之一, 玉米均为正常施肥, 灌溉, 植株密度为 6.2 万株/hm²。试验地玉米从 2009 年 6 月中下旬播种起至 10 月 3 日收获止, 生长期共 107 d。期间累积降水量 619.4 mm, 属较丰水年份。7 月 29 日进行了灌溉, 灌溉水量为 50 m³/667 m²。

试验仪器选取频域反射仪(FDR, JL-19 型), 中子土壤水份仪(CNC503B 型)分别观测土壤表土(10 cm)和剖面含水率(30 ~ 190 cm), 通过烘干法与 FDR, 中子仪测量结果对比, 对 FDR 和中子仪实测数据进行修正。四块试验地中均设有中子仪管, 埋深 1.9 m, 进行剖面各土壤层含水率测量(层距 20 cm)。设计每五天进行一次观测, 遇降雨或者灌溉后则连续测量五天。每块试验地中选取 10 株样本苗(共 40 株), 在玉米生育的主要阶段用钢尺测量植株叶片长和宽, 每 10 ~ 15 天测量一次, 并计算叶面积指数。通过水井每五天观测一次地下水水位。试验期

收稿日期: 2011-02-23

基金项目: 国家自然科学基金创新群体研究基金(51021006); 国家重点基础研究发展计划(2006CB403401); 国家自然科学基金重点基金(40830637); 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAB04A16)

作者简介: 李 玮(1985—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 从事水资源与水环境规划的研究。E-mail: liwei.iwhr@gmail.com。

间同时测量并计算了土壤各层的容重。计算所需气象资料主要来自试验站内的自动气象观测站。

试验设计的主要原理如图 1 所示,土壤水的变化主要是由降水和蒸散发引起,掌握了降雨和土壤水的水量变化等情况就可以根据水量平衡法推求出通过土壤蒸发和植被蒸腾而损失的总的蒸散发量 ET(Evapotranspiration),水量平衡方程如下:

$$\Delta h = (P - I_c) - R - ET - I \quad (1)$$

式中, Δh 为土壤含水量的变化(以水深计); P 为研究区降雨或灌溉水; I_c 为植被截留蒸发; R 为地表径流; ET 表示蒸散量; I 表示地下水补给作用和土壤下渗作用对含水量变化的综合的结果。以下计算方法中将详细介绍如何计算这些通量。

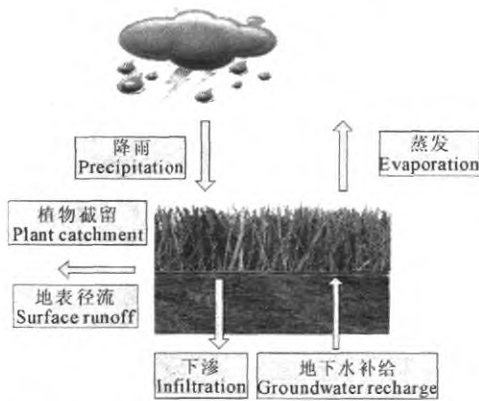


图 1 水量平衡法测定作物 ET 示意图

Fig.1 Mensuration of crop ET with the method of water balance

2 计算方法

2.1 叶面积指数计算

叶片分为展叶和见叶进行测量和计算,展叶的最大长宽乘积的 0.75 倍(见叶为 0.5 倍)记为其叶片面积,叶片面积总和与占地面积的比值即为叶面积指数。在玉米生长的主要阶段进行测量,试验期间共测量 6 次,其他时期所需叶面积指数通过插值方法得到。

$$LAI = [0.75 \sum (A \times B)_{\text{展叶}} + 0.5 \sum (A \times B)_{\text{见叶}}] / S_{\text{占地}} \quad (2)$$

2.2 植被截流计算

降雨时会形成作物截流,截流的降水会形成蒸发,植被截流与植被生长状态以及降雨量有关,具体计算公式为:

$$Can = Can_{\max} \frac{LAI}{LAI_{\max}} \quad (3)$$

当 $P \leq Can - P_{(i)}$ 时, $I_c = P_{(i)} + P, R = 0$;

当 $P > Can - P_{(i)}$ 时, $I_c = Can, R = P - (Can -$

$P_{(i)})$

式中, Can 表示植被一定生长阶段可截流的最大降雨量; $Can_{\max}$ 表示植被叶面积指数最高时可截流的最大降雨量; $P_{(i)}$ 表示叶片上初始水量,因研究区降雨历时短,连续性不强,此值设为 0; I_c 表示最终叶片上截流雨量; $LAI, LAI_{\max}$ 分别为叶面积指数和生长期中最大叶面积指数; R 表示经过植被截流后落到地面的雨量; P 表示初始降雨量。根据实际经验,计算时, $Can_{\max}$ 可选取为 3 mm。

2.3 ET 计算

计算首先将所测量的土壤重量含水率转换为含水深,然后计算土壤层含水的蓄变量,公式如下:

$$\Delta h = \frac{v_{\text{水}}}{a_{\text{计算}}} = \frac{\Delta w \times \gamma \times h_{\text{计算}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (4)$$

式中, h 为含水深; $a_{\text{计算}}, v_{\text{计算}}$ 分别为计算区表面积和体积; w 为土壤重量含水率; γ 为土壤容重,测量值如表 1 所示, $\rho_{\text{水}}, v_{\text{水}}$ 分别为水的密度和体积。试验中每个计算单元为 $1 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ m}$,本文主要计算 0 ~ 160 cm 层土体,以测量层土壤含水率代表其上下 10 cm 层平均含水率,如 50 cm 层含水率代表 40 ~ 60 cm 层的均值。

表 1 土壤各层容重测量值(g/cm^3)

Table 1 The capability of given soil layers

深度(cm) Depth	第一次容重 1st capability	第二次容重 2nd capability	平均值 Average
0 ~ 10	1.45	1.45	1.45
10 ~ 30	1.50	1.55	1.52
30 ~ 50	1.42	1.41	1.41
50 ~ 70	1.39	1.36	1.38
70 ~ 90	1.41	1.36	1.39
90 ~ 110	1.58	1.56	1.57
110 ~ 130	1.53	1.48	1.50
130 ~ 150	1.45	1.41	1.43
150 ~ 170	1.44	1.43	1.43
170 ~ 190	1.50	1.43	1.47

本文中,因土壤含水量较高,忽略地下水补给土壤层水量,主要考虑降雨入渗补给地下水量,这主要取决于降水量及土壤特性,通过地下水位变幅来计算^[14]:

$$I = \mu \times \Delta h \quad (5)$$

式中, μ 为给水度,根据地下水位处的土壤特性,确定为 0.035; Δh 为地下水位变幅。因试验地基本不会形成地表径流,设定 $R = 0$ 。

以上为计算水量平衡中其他各通量过程,ET 值可根据公式 1 结合以上结果进行推导得到。

3 结果分析

3.1 玉米生长期不同土壤层含水率变化情况

玉米生长期降雨及土壤重量含水率的变化情况如图 2 所示。降雨多集中在 8 月份,最高日降雨量出现在 8 月 16 日,为 117.2 mm。各土层土壤含水率的变化趋势大体一致。表层土壤含水率随降雨变化较剧烈;30~50 cm 层属过渡层,土壤含水率比表

层稳定,变化趋势基本一致,但与其下层比较仍不平稳,含水率变化情况较大;50 cm 以下各层变化趋势基本一致,含水率变化基本相同。土壤含水率在 30 cm 层较低,50 cm 及其以下各层土壤含水率随深度增加而不断加大。由图中可以看出,表层含水率对降雨的敏感性最高,初期变化幅度大,中后期由于降雨量偏多,变化幅度不大。

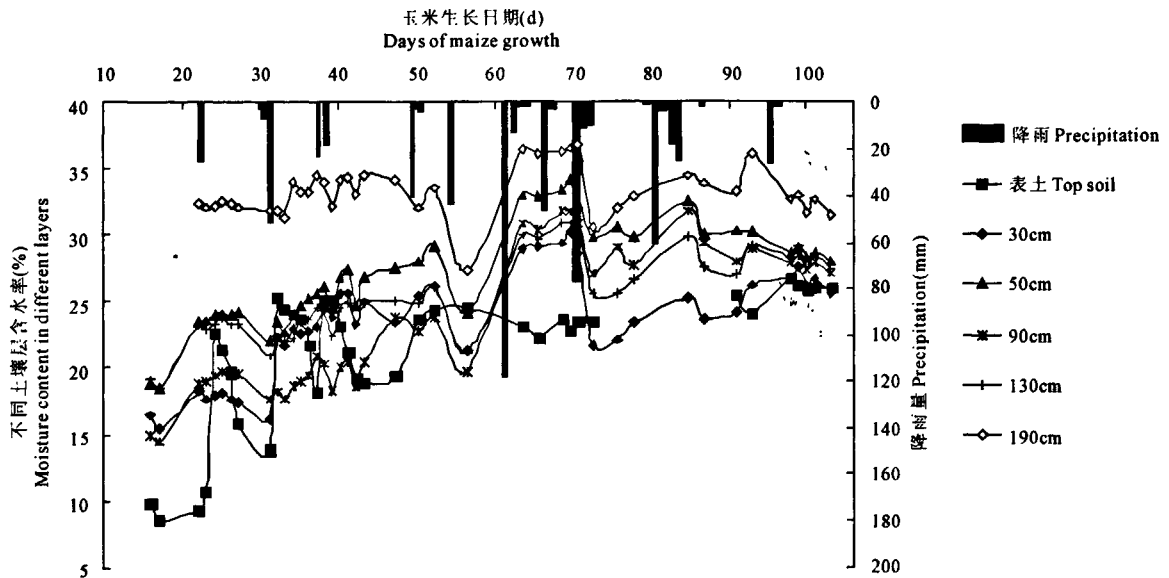


图 2 玉米生长期降雨及不同土壤层含水率变化

Fig.2 The precipitation and moisture content of given soil layers during the growth period of maize

各土壤层在玉米生长期含水率均有一定程度的增大。八月份比七月份各层均有增长,增长最高的为 90 cm 层,涨幅达到 45.9%,最低为 190 cm 层,增长幅度为 2.62%;九月份比八月份含水率有增长也有降低,其中表层土壤增长最高,为 11.5%;50 cm 层含水率减少较多,为 2.83%。

3.2 降雨后土壤水分变化分析

2009 年 7 月 16 日、17 日研究区共降雨 58.3 mm,图 3 为 7 月 17 日到 22 日六天土壤 z 重量含水率变化情况,颜色越深代表土壤含水量越高。此次降雨前后五天内都没有其他降雨,可以充分的体现出降雨后土壤水分迁移的过程。表层土壤在 18 日增长,以后五天逐渐降低,一部分是由于蒸散发消耗,另一部分下渗到土壤下层。由图中可以看到,降雨五天后,水分基本下渗到 50~70 cm 层。90~110 cm 层土壤含水率出现谷值,主要是因其接受上层土壤水分补给量小,另外,此层接受地下水补给量也较低。

3.3 含水率随土壤深度变化分析

图 4 所示为玉米主要代表性生长阶段土壤含水

率随深度变化的情况。可以看出,土壤表层含水率较低,表层以下土壤含水率逐渐增加,50 cm 处达到极大值,之后逐渐降低,到 90~100 cm 层为止,土壤含水率出现极小值点,这层以下含水率逐渐上升,最下层(190 cm)层为测量范围内土壤含水率最高点,次层含水率较稳定。玉米整个生长期,各层平均土壤重量含水率分别为:22.6%,18.8%,24.2%,28.0%,27.5%,24.9%,24.1%,26.1%,28.4%,29.5%,33.3%。50 cm 层具有极高值 28.0%,110 cm 层出现极小值 24.1%,190 cm 层为测量最高值 33.3%。

3.4 玉米生长期综合 ET 分析

玉米生长期叶面积指数总共测量六次,8 月 23 日为测量最高值,达到 5.693,处于抽穗到灌浆时期,玉米生长最为旺盛,以后逐渐降低。八月中下旬降雨量较大,这一时期总净雨量为 248.4 mm。整个生长期总降雨量为 619.4 mm,总净雨为 588.4 mm。表 2 所示为按照玉米主要生长期分时间段统计的各项值。其中,蒸散系数为蒸散量占同期总降水量的比例。

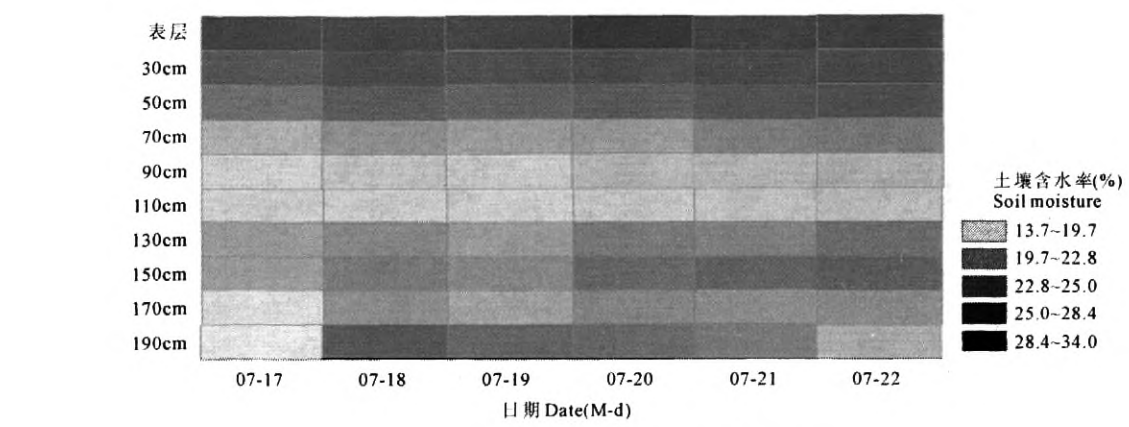


图 3 7 月 17 日 ~ 22 日土壤水分变化示意图
Fig.3 The movement of soil water during July 17 ~ 22, 2009

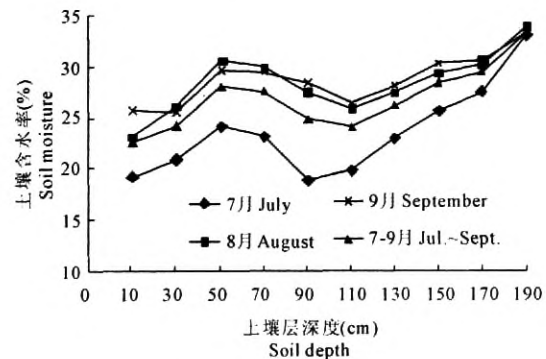


图 4 玉米主要生长期土壤含水率随深度变化
Fig.4 The changes of soil moisture by depth during the growth period of maize

玉米出苗后,日均总蒸散发量在 8 月 10 日 ~ 8

月 25 日最高,为每天 6.508 mm,这段时间的叶面积指数也最高,抽雄—灌浆期玉米处于生长高峰期,耗水量大,这个阶段 15 天总蒸散量为 97.6 mm;这阶段之前,ET 随叶面积指数增长而不断升高,之后,随叶面积指数降低而不断减少,最低为灌浆—成熟期,平均日蒸散发量分别为 1.799 mm。可见玉米的总耗水与叶面积指数有一定的关系,图 5 为玉米生长阶段和成熟阶段叶面积指数与 ET 关系的图示。在玉米成熟阶段,叶面积指数较高,但这一阶段 ET 较长期偏低。最高蒸散系数出现在九月中下旬,达到了 1.53,主要是由于这一时期降雨偏少,蒸发量大造成。蒸散系数最低为八月中下旬的 0.33,整个生长期内蒸散系数为 0.62。

表 2 玉米不同时期生长特性和 ET 表
Table 2 The characters and ET of maize in different growth stages

指标 Index	播种 ~ 苗期 Sowing ~ seedling 06 - 16 ~ 07 - 01(16 天)	苗期 ~ 拔节 Seedling ~ jointing 07 - 02 ~ 07 - 18(16 天)	拔节 ~ 抽雄 Jointing ~ tasseling 07 - 19 ~ 08 - 09(22 天)	抽雄 ~ 灌浆(1) Tasseling ~ grouting(1) 08 - 10 ~ 08 - 25(15 天)	抽雄 ~ 灌浆(2) Tasseling ~ grouting(2) 08 - 26 ~ 09 - 08(14 天)	灌浆 ~ 成熟 Grouting ~ maturity 09 - 09 ~ 10 - 03(24 天)	全生育期 Whole growth period 06 - 16 ~ 10 - 03
叶面积指数(测量日期) LAI(Measuring date)	—	0.412 (7.8)	2.687 (7.28)	5.693 (8.23)	3.74 (9.12)	2.857 (9.21)	—
总净雨(mm) Total net rainfall	0	82.8	120.5	248.4	111.0	25.7	588.4
ET(mm/d)	1.200	3.601	5.744	6.508	2.790	1.799	3.580
ET(mm)	19.20	57.61	126.36	97.62	39.06	43.19	383.0
蒸散系数 ET coefficient	—	0.69	0.99	0.37	0.33	1.53	0.62

注: * 播种 - 苗期的蒸散发量为估算值。
Note: The values of ET during sowing ~ seedling are estimates.

4 结论与展望

试验区 7 月份到 9 月份土壤 10 ~ 190 cm 层平均

重量含水率分别为 22.6%, 18.8%, 24.2%, 28.0%, 27.5%, 24.9%, 24.1%, 26.1%, 28.4%, 29.5%, 33.3%。在 50 cm 层出现含水量极大值, 110 cm 出

现含水量极小值, 110 cm 以下土壤含水量逐渐上升, 190 cm 处最高。

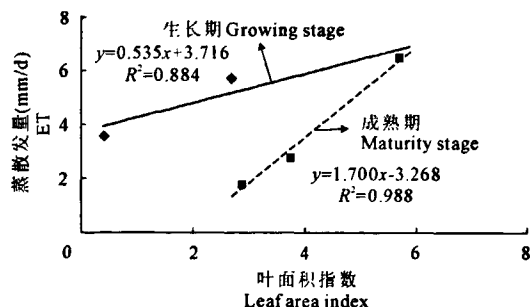


图 5 玉米成长期与成熟期叶面积指数与总蒸散发关系

Fig.5 The correlation between leaf area index and ET in growing and grown periods

华北平原黑龙港地区玉米不同生长阶段总蒸散发量分别为 1.2, 3.6, 5.7, 6.5, 2.8, 1.8 mm/d, 整个生长期平均为 3.6 mm/d, 总量为 383.0 mm。ET 在玉米成长期和成熟期与叶面积指数均成明显的线形关系, 最高叶面积指数为 5.693, 出现在八月下旬。蒸散系数最高为 1.53, 出现在九月中下旬, 玉米生长期平均蒸散系数为 0.62。

通过实测玉米生长期土壤墒情, 利用水量平衡法计算其整个生长期的耗水过程, 为研究强人类活动下的“二元”水循环过程的奠定了基础。本试验研究摸清了部分人类农业活动下“二元”水循环的耗水状况, 今后会向更细致更广泛的方向发展, 比如继续测定小麦棉花等农作物生长期内的耗水过程, 并对作物蒸散规律的内在机理进行研究, 以摸清农业活动中的总耗水过程, 并为农业节水技术研究及水

循环通量过程研究提供基础依据。

参考文献:

- [1] 王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [2] 秦大庸, 吕金燕, 刘家宏, 等. 区域目标 ET 的理论与计算方法[J]. 科学通报, 2008, 53(19): 2384—2390.
- [3] 高照全, 张显川, 王小伟. 桃树冠层蒸腾动态的数学模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 489—495.
- [4] 康绍忠, 蔡焕杰, 梁银丽, 等. 大气 CO₂ 浓度增加对春小麦冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态影响的试验研究[J]. 生态学报, 1997, 17(4): 412—417.
- [5] 王安志, 裴铁铮. 长白山阔叶红松林蒸散量的测算[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1547—1550.
- [6] 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发蒸腾的研究[J]. 水利学报, 1998, (10): 36—39.
- [7] 刘群昌, 谢森传. 华北地区夏玉米田间水分转化规律研究[J]. 水利学报, 1998, (1): 62—68.
- [8] 黄志宏, 王旭, 周光益, 等. 不同理论方程模拟华南桉树人工林蒸散量的比较[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1107—1111.
- [9] 赵梅芳, 项文化, 田大伦, 等. 基于 3-PG 模型的湖南会同杉木人工林蒸发散估算[J]. 湖南农业科学, 2008, (3): 158—162.
- [10] 裴冬, 张喜英, 李坤. 华北平原作物棵间蒸发占蒸散比例及减少棵间蒸发的措施[J]. 中国农业气象, 2000, 21(4): 33—37.
- [11] 萧复兴, 晋凡生, 张彦芹. 旱地玉米农田棵间蒸发研究[J]. 激光生物学, 1996, 5(4): 938—941.
- [12] 刘娜娜, 刘钰, 蔡甲冰. 夏玉米生育期叶面蒸腾与棵间蒸发比例试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 5—8.
- [13] 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (11): 108—113.
- [14] “七五”国家重点科技攻关项目组. 华北地区大气水—地表水—土壤水—地下水相互转化关系研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1990.

Research on integrated evapotranspiration of maize in Heilonggang plain

LI Wei, CHEN Gen-fa, LIU Jia-hong, LU Lu, QIN Da-yong

(China Research Institute of Water Resource and Hydropower, Beijing 100038, China)

Abstract: For making the flux of dualistic water cycle affected by human activities clearly, soil moisture content of surface and profile were measured separately by FDR and the neutron probe in Heilonggang area of Hebei Plain during the growth period of maize. The growth characteristics of maize and the correlation analysis between precipitation and soil moisture content were analyzed. Based on this, the evapotranspiration (ET) was calculated and analyzed in the stages of maize seedling, jointing, tasselling, grouting and so on. The results show that the total evapotranspiration is 383.0 mm during the maize growth period and the average ET is 1.2, 3.6, 5.7, 6.5, 2.8, 1.8 mm/d respectively. ET is highly related with the leaf area index (LAI) during various growing periods. The highest LAI is 5.693 and the average ET and precipitation rate is 0.62. This research is part of the study of duality water cycle under intense human activity.

Keywords: maize; soil moisture content; evapotranspiration; Heilonggang