

太行山山前平原区蒸散量和作物灌溉需水量的分析

李新波¹, 孙宏勇^{2, 3*}, 张喜英², 沈彦俊², 董宝娣², 胡春胜²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 中国科学院遗传与生物学发育研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100010)

摘 要: 应用 Penman-Montieth、Priestley-Taylor 和 FAO-24 Blaney-Criddle 3 种方法计算了太行山山前平原高产区的参考作物蒸散量并对计算结果和利用实际蒸散量计算的作物系数进行了分析, 结果表明: Penman-Montieth 公式和 FAO-24 Blaney-Criddle 公式估算的参考作物蒸散量结果相近, 而 Priestley-Taylor 方法结果偏低; 在不同公式基础上计算的作物系数也存在着明显的差异, 以 Penman-Montieth 公式为基础计算的作物系数比较合理, FAO-24 Blaney-Criddle 计算的作物系数在 4 月到 10 月之间比较合理, Priestley-Taylor 公式计算的作物系数偏高; 在分析了多年作物系数的基础上, 对不同水分年型下的作物需水量和灌溉需水量进行了计算, 冬小麦和夏玉米季的灌溉需水量分别在 270~400 mm 和 0~330 mm 之间。

关键词: 太行山山前平原; 参考作物蒸散量; 实际蒸散量; 作物需水量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)2-0026-05

李新波, 孙宏勇, 张喜英, 等. 太行山山前平原区蒸散量和作物灌溉需水量的分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 26-30.

Li Xinbo, Sun Hongyong, Zhang Xiying, et al. Analysis of irrigation demands and evapotranspiration in the piedmont of Taihang Mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 26-30. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

太行山山前平原区是华北平原的农业高产区。该地区的主要种植制度是冬小麦+夏玉米的一年两作制度。这种种植制度每年的实际蒸散量约为 800~900 mm, 大大超过了同期的降水量^[1]。因此, 为了补充作物水分的亏缺而获得高产, 灌溉是必须的。但是, 该地区 80% 的地面径流和地下水已经被灌溉利用, 浅层水和深层水的利用已经引起了地下水位下降和许多环境问题^[2]。该区域的地下水水位正在以每年大约 1 m 的速度下降, 其主要原因就是冬小麦灌溉面积的扩大, 降水的减少和比较低的水分利用效率^[3]。可利用水资源的短缺已经成为限制该地区农业发展的主要因素之一。因此, 制定合理的作物灌溉制度以及区域灌溉需水量计划, 已经成为有效利用水资源和制定区域水资源利用规划的关键环节。作物蒸散量是制定作物灌溉制度和区域灌溉需水量计划的基本依据^[4-6]。但是, 在实测作物蒸散量过程中,

往往有很多影响因素难以控制, 因此需要研究作物蒸散量的估算方法。目前, 运用最广泛的作物蒸散量计算方法是通过参考作物蒸散量和作物系数确定作物的实际蒸散量。

参考作物蒸散量指高度一致(8~15 cm), 生长旺盛, 水分充足, 完全覆盖地面的绿色草丛植被的蒸散量^[4]。由于对地表植物作了严格的定义, 因此它的变化只与气象因素有关。过去的 50a 中, 科研工作者提出了许多适于不同气候条件的参考作物蒸散量计算公式, 但是由于这些方法的局限性很大, 很难在全球范围内普遍应用, 只能根据当地具体条件分析选用。为了对其其中的一些主要方法进行全面的评价, 封志明等^[7]利用不同模型对甘肃近 20 年的参考作物蒸散量进行了分析, 认为 Penman-Montieth (P-M) 公式是比较理想的公式, Jensen 等分别对不同气候条件下计算参考作物蒸散量的主要方法进行了比较研究, 结果表明, 不论在湿润或干旱半干旱地区, Penman-Montieth (P-M) 公式都可以较准确地计算参考作物蒸散量^[8]。基于这一结论, 1990 年 FAO 专家组成员将这种方法定为计算参考作物蒸散量的标准方法。虽然 P-M 公式可以准确估算参考作物蒸散量, 但是该公式需要非常详尽的气象资料才能得以应用, 而在许多地区, 气象资料往往是有限的。在这些地区, 可以应用一些其它的计算模型如温度模型等来估算参考作物蒸散量。本文运用 P-M 公式、Priestley-Taylor (P-T) 公式和 FAO-24 Blaney-Criddle (B-C) 公

收稿日期: 2006-10-19 修订日期: 2007-01-12

资助项目: 国家自然科学基金(40371024); 国家科技攻关课题(2004ba508b01)

作者简介: 李新波(1976-), 男, 新疆人, 博士生, 主要研究农业水土资源管理。北京 中国农业大学资环学院, 100094。Email: liyilong@126.com

*通讯作者: 孙宏勇, 男, 主要从事农田水分运输及节水技术研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100010。Email: hysun@ms.sjziam.ac.cn

式等计算模型对太行山山前平原区 1984~2005 年每月的参考作物蒸散量进行了计算。由于 P-M 公式较全面地考虑了影响蒸发面蒸散的各种因素, 并且在气候条件差异较大的不同地区(湿润、干旱或风速变化范围较大等)的应用中也取得了较好的结果^[9], 因此本文以这种方法为参照, 与其它方法进行比较, 在此基础上对该地区的冬小麦+夏玉米的一年两作的作物的月份灌溉需水量、作物系数进行了分析。

1 试验区概况和研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于太行山山前平原, 为暖温带半湿润半干旱气候。该区光热资源丰富, 多年平均降水量 480.7 mm。其是全国的主产区之一, 冬小麦+夏玉米的一年两作种植制度是其主要耕作制度。冬小麦是 10 月初种植次年 6 月中旬收获, 夏玉米是 6 月中旬种植 9 月底收获。

1.2 参考作物蒸散量的计算方法

1.2.1 Penman-Montieth 公式

P-M 公式^[10]是在全面考虑了影响田间水分散失的大气因素和作物因素的基础上, 把能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一个对处于任何水分状态下的任何植被类型都成立的蒸发方程中而得到的, 表达式为

$$ET_{pm} = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中 ET_{pm} ——P-M 公式计算的参考作物蒸散量, mm; Δ ——饱和水汽压温度曲线上的斜率, $kPa \cdot K^{-1}$; Rn ——净辐射, $MJ \cdot m^{-2}$; G ——土壤热通量, $MJ \cdot m^{-2}$; γ ——湿度计常数, $kPa \cdot K^{-1}$; e_a ——汽压, kPa ; e_d ——饱和水汽压, kPa ; U_2 ——高度 2 m 处的风速, $m \cdot s^{-1}$; T ——气温, $^{\circ}C$ 。

1.2.2 Priestley-Taylor 公式

P-T^[10]是在无平流的假设条件下, 以平衡蒸发为基础, 建立了参考蒸散与净辐射能量之间的经验关系。

$$ET_{pt} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G) \quad (2)$$

式中 ET_{pt} ——P-T 公式计算的参考作物蒸散量, mm。

P-T 公式分析了海洋和大范围饱和陆面资料, 认为常数 α 的最佳值为 1.26。后来, 许多学者发现 α 有日变化和季节变化^[11-13]。这表明 α 不是常数, 它实际上反映了平流的变化情况。因此, 若将 α 当作变量, 则 P-T 公

式也可用于估算平流条件下的蒸发力。Davies 和 Allen^[15], Barton^[16] 以及 Mawdsley 和 Ali^[17] 进一步发展了 P-T 公式, 他们将 α 当作土壤含水率的函数。根据张志明的研究^[14], α 与温度、海拔高度和相对湿度有关, 可表示为

$$\alpha = (1 + \frac{1}{\Delta/\gamma}) - 0.5(\frac{1}{\Delta/\gamma})(1 + f^6) \quad (3)$$

式中 f ——相对湿度, %; Δ, γ 意义同上。

1.2.3 FAO-24 Blaney-Criddle 公式

该方法是考虑土壤水分供应充足时, 参考作物蒸散量随着日平均温度和每日白昼小时数占全年白昼小时数的百分比而变化, 表达形式

$$ET_{bc} = a + bp(0.46T + 8.18) \quad (4)$$

其中

$$b = a_0 + a_1 RH_{min} + a_2 n/N + a_3 Ud + a_4 RH_{min} n/N + a_5 RH_{min} Ud$$

$$a = 0.0043 RH_{min} - n/N - 1.41$$

式中 ET_{bc} ——B-C 公式计算的参考作物蒸散量, mm; p ——日白昼小时数占全年昼长时数的百分比, %; n/N ——实测白昼时数和可能白昼时数的比值; RH_{min} ——日最低相对湿度, %; Ud ——白天平均风速, $m \cdot s^{-1}$ 。系数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 和 a_5 分别为 0.819, -0.00409, 1.071, 0.0656, -0.00597 和 -0.000597。

1.3 实际蒸散量

实际蒸散量用大型称重式蒸渗仪进行测定。该大型蒸渗仪建成于 1995 年, 大型称重式蒸渗仪含原状土体, 共 14 t, 面积 3 m^2 , 深 2.5 m, 测量精度为 0.02 mm。其种植的作物品种、时间和管理措施与大田一致, 内设中子管, 每 7 d 测定一次土壤含水率, 使 1.5 m 土体的土壤含水率大于田间持水量的 80%, 即认为是无水分胁迫情况下的蒸散量, 因此, 可以利用其与参考作物蒸散量计算作物系数。

2 结果与分析

2.1 参考蒸散量不同计算方法的结果比较

由图 1 可知: 在近 20 多年内, 不同公式计算的年参考作物蒸散量的变化趋势是相同的, 但是数值有一定差异。P-M 公式估算的结果最大, B-C 公式较小, P-T 公式最小, 多年的年均参考作物蒸散量分别为 914.4, 875.0 和 637.2 mm。但年际间的变化有一定的差异, P-T 公式计算的值最大相差 236.8 mm, B-C 公式相差 272.7 mm, P-M 公式相差 245.8 mm。P-T 公式估算的参考作物蒸散量偏低的主要原因是其缺少了空气动力学项, 虽然 α 是利用相对湿度、温度和海拔高度等参数确定的但仍然不能够对空气动力学项的缺失进行弥补。

B-C 公式是以日平均温度为主要变量的计算模型,同时考虑了日照时数、风速和相对湿度的影响,其实际是将 P-M 公式中的辐射项和空气动力学项分别通过用日照时数和风速、相对湿度进行了替代,虽然存在一定误差,但是相关性仍然比较好。总之,计算数值的差异是由计算公式中空气动力学项和辐射项两个方面不同引起的。

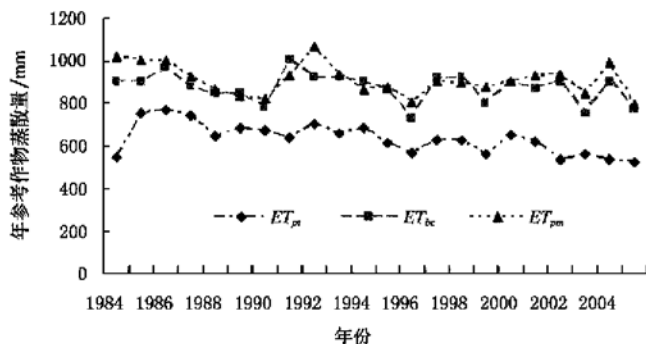


图 1 不同公式计算的年参考作物蒸散量的比较

Fig. 1 Comparison of annual reference evapotranspiration calculated by different methods

同时,对不同公式估算的月参考作物蒸散量用 5 年滑动平均值作线性趋势分析,结果如式(5)、(6)和(7)。由相关性来分析不同公式计算的作物参考蒸散量的年际变化趋势,相关性大说明年际下降趋势非常明显,而相关性弱说明下降趋势不明显。因此,由 P-T 方法测定的参考作物蒸散量有着明显的年际下降趋势,而其他两种方法没有显著的变化。这主要是因为 P-T 方法计算的参考作物蒸散量是与辐射有关,而 Stanhill 和 Cohen^[18]认为云量和气溶胶的增加导致的近年来全球太阳辐射的下降说明气候变化中净辐射通量是有减少的趋势。全球辐射下降但是气温是升高的,这是现在还没有完全解释清楚的问题,而 B-C 模型主要考虑的是日均温度和日照时间所以变化较小,趋势不明显, P-M 模型则是充分考虑了辐射和空气动力学两个方面的因素,变化趋势不明显。

$$ET_{pt} = -8.3373Y + 17268 \quad R^2 = 0.9493 \quad (5)$$

$$ET_{bc} = -1.9411Y + 4742.8 \quad R^2 = 0.3666 \quad (6)$$

$$ET_{pm} = -1.1892Y + 3273.4 \quad R^2 = 0.0849 \quad (7)$$

式中 Y——年份。

由图 2 可知,与 P-M 公式计算的结果相比较,B-C 与 P-T 公式计算的参考蒸散量均存在一定的偏差。P-T 公式测定的月均参考蒸散量均低于 P-M 公式计算的值,但是变化趋势是一致的 ($R^2 = 0.82$),而 B-C 公式计算的结果与其比较一致 ($R^2 = 0.88$)。

2.2 冬小麦-夏玉米的实际蒸散量的变化

由图 3 可知:作物实际蒸散量在不同月份的变化,

5 月份最高达到 163.2 mm,然后是 8 月份,7 月份和 4 月份,而最小值出现在 12 月份,仅有 11.8 mm。6 月份实际蒸散量较小的原因是由于这段时间冬小麦收获而播种夏玉米,植物蒸腾减少导致蒸散量减少。标准差大的主要出现在 3、4、5 和 6 月份,其中 5 月份最大,这主要是由于气候变化尤其是气温和降水对蒸散量的影响造成的,因为在这段时间内温度增长是最大的而降水量的变化性较大。

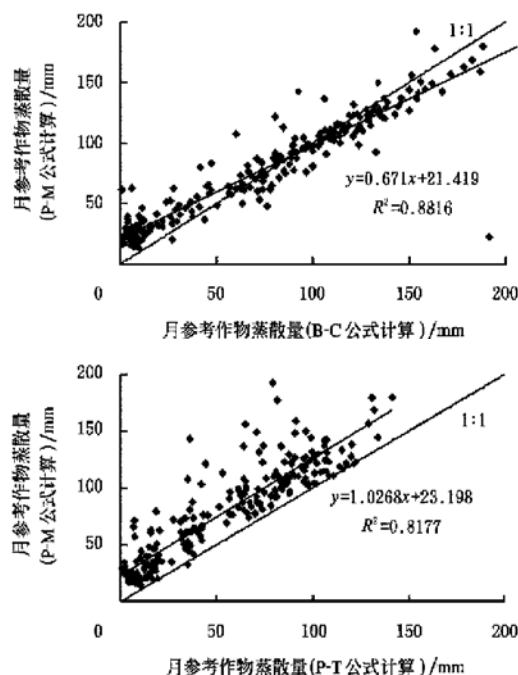


图 2 不同公式计算的月均参考作物蒸散量的比较

Fig. 2 Comparison of monthly reference evapotranspiration calculated by different methods

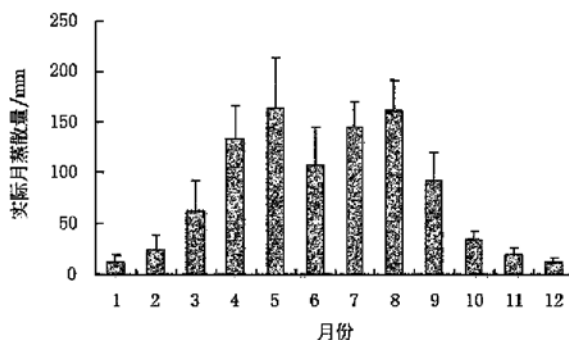


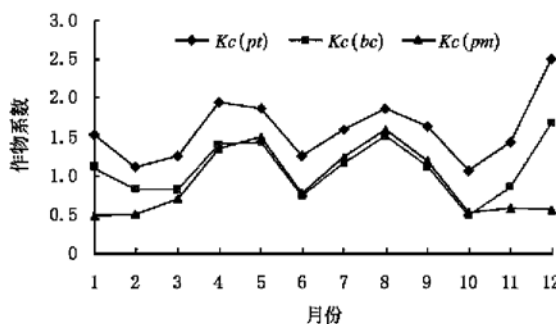
图 3 1995~2005 年平均实际月蒸散量的变化

Fig. 3 Distribution of mean monthly actual evapotranspiration from 1995~2005

2.3 冬小麦-夏玉米作物系数的差异变化

作物系数反映作物本身的生物学特性,主要与作物的种类、品种、生育阶段和作物的叶面积指数等因素有关,可用作物实际蒸散量与相应时期的参考作物蒸散量的比值来表示。

由于该地区是冬小麦+夏玉米的一年两作的种植制度,所以10月份到次年6月初反映的是冬小麦的作物系数,而6月中旬到9月份反映的是夏玉米的作物系数。用大型蒸渗仪和不同模型计算的作物系数的变化如图4所示:由B-C与P-T公式计算的作物系数 $Kc(bc)$ 和 $Kc(pt)$ 有3个峰值,而P-M公式计算的作物系数 $Kc(pm)$ 有2个峰值。峰值出现的时间是相同的,一个出现在4、5月份,一个出现在8月份,而 $Kc(pt)$ 和 $Kc(bc)$ 另一个峰值出现的时间是在12月份和1月份。这是由于这段时间参考作物蒸散量的数值偏小造成的。因为在12月、1月份冬小麦处于越冬期,停止了生长,而P-T和B-C公式计算的作物系数由于其主要的气象因素是平均温度,导致在越冬期的参考作物蒸散量比较小,而作物系数较大。从作物系数本身反映的情况考虑,P-T和B-C公式计算的作物系数偏大,P-M计算的作物系数比较合理,应该利用P-M公式来计算作物系数。



注: 10月份到6月上旬为冬小麦季, 6月中旬到9月份为夏玉米季

图4 不同模型计算的作物系数的变化

Fig. 4 Changes of monthly crop coefficient calculated by different methods

2.4 作物需水量和灌溉需水量的变化

通过上述的分析,P-M公式计算的参考蒸散量是比较合理的,所以用P-M公式计算的多年的作物系数

表1 不同水分年型下的作物需水量、降水量和灌溉需水量

Table 1 Crop water requirements, rainfall and irrigation demands under different rainfall years mm

	不同水分年型	作物需水量	降水量	灌溉需水量
小麦季	少水年	453.5	56.6	396.9
	平水年	482.6	109.5	373.1
	多水年	450.3	181.5	268.8
玉米季	少水年	512.1	179.4	332.7
	平水年	489.4	330.5	158.9
	多水年	402.4	507.3	- 104.9
全年	少水年	993.9	283.9	710.0
	平水年	985.0	452.1	532.9
	多水年	865.3	671.6	193.7

注: 多水年为在25%的降水保证率下的几年的平均值,平水年为50%保证率下的平均值,少水年为75%保证率下的平均值。

对不同水分年型下的作物需水量和灌溉需水量进行了比较。由表1可知:在不同水分年型下的灌溉需水量是显著不同的。全年的灌溉需水量的范围为193.7 mm到710.0 mm,而其中主要集中在冬小麦季节因为冬小麦季节的需水量在多水年达到268.8 mm,而在少水年更是达到396.9 mm。夏玉米季节的灌溉需水量在少水年需要330 mm左右的灌溉水量,而其它水分年型条件下,灌溉需水量比较少,多水年不仅不需要灌溉,还可以增加土壤蓄水量。

3 结论与讨论

1) 通过对3种不同方法计算的参考作物蒸散量的比较和作物系数所反映的情况来考虑,P-M公式计算的参考作物蒸散量比较合理,而B-C公式计算的参考作物蒸散量是以日平均温度为主要变量的简化模型在4月份到10月份之间比较合理,所以在这段时间内也是可以利用的。P-T公式虽然考虑了 α 的变化,但是仍然偏小,应该在对 α 值进行分析和确定后才可利用。

2) 不同方法估算的作物系数的变化趋势是相同的,反映了一年两作条件下的冬小麦和夏玉米的主要需水时期是在冬小麦季的4、5月份和夏玉米季的8月份。

3) 在由多年实际蒸散量确定了作物系数的情况下,分析不同水分年型条件下的作物灌溉需水量得出,年灌溉需水量的范围从193.7 mm到710.0 mm,而主要集中在冬小麦生长季节和少水年分的夏玉米季。

实际农田蒸散量对研究农田水分利用效率和农田灌溉制度是必不可少的,但是一些地区往往缺少这些资料,而实际蒸散量可以根据参考作物蒸散量和作物系数进行估算。因此,确定合理的参考作物蒸散量的计算方法是具有现实意义的。在该地区,农业用水占国民用水的70%左右,因而利用合理的参考作物蒸散量确定了该地区的主要作物冬小麦和夏玉米的需水量范围后可以根据不同作物在不同时期对水分的敏感程度进行适量灌溉,减少灌溉,达到节水的目的。

[参 考 文 献]

- [1] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agric Forest Meteor, 2002, 111, 109- 120.
- [2] 刘昌明,魏忠义. 华北平原农业水文及水资源[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 236.
- [3] 胡春胜,张喜英,陈素英,等. 太行山前平原地下水动态及超采原因分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18 (2): 89- 91.
- [4] Doorenbos J, Pruitt W O. Crop water requirements[A].

- Irrigation and Drainage Paper No. 24(rev.) [R]. FAO, Rome, Italy, 1977: 144.
- [5] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 122-137.
- [6] 姚德良, 朱进生, 谢正桐, 等. 土壤水盐运动模式研究及其在干旱区农田的应用[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 286-291.
- [7] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 99-103.
- [8] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements [A]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice[Z]. 1990, No. 70: 332.
- [9] Allen R G, Jensen M E, Burman R D. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. Agron J, 1989, 81: 650-662.
- [10] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters [J]. Mon Weather Rev, 1972, 100: 81-92.
- [11] Jury W A, Tanner C B. Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula [J]. Agron J, 1975, 67: 840-842.
- [12] Mukammal E I, Neumann H H. Application of the Priestley-Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighting lysimeter and class A Pan [J]. Boundary Layer Meteorology, 1977, 12: 243-256.
- [13] Debruin H A R, Keijman J Q. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands [J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(7): 898-903.
- [14] 张志明. 湿润下垫面的近地面层内感热和潜热垂直通量的计算[J]. 成都科技大学学报, 1984, (2): 89-96.
- [15] Davies J A, Allen C D. Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern Ontario [J]. Journal of Applied Meteorology, 1973, 12(4): 649-657.
- [16] Barton I J. A parameterization of the evaporation from non-saturated surfaces [J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(1): 43-47.
- [17] Mawdsley J A, Ali M F. Estimating non-potential evapotranspiration by means of the equilibrium evaporation concept [J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 383-391.
- [18] Stanhill G, Cohler S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agric Forest Meteorol, 2001, 107: 255-278.

Analysis of irrigation demands and evapotranspiration in the piedmont of Taihang Mountain

Li Xinbo¹, Sun Hongyong^{2,3*}, Zhang Xiyong², Shen Yanjun², Dong Baodi², Hu Chunsheng²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China;

3. Institute of Geological Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100010, China)

Abstract: Reference evapotranspiration was estimated by using Penman-Montieth (P-M) equation, Priestly-Taylor (P-T) equation and FAO-24 Blaney-Criddle (B-C) equation, and crop coefficient was also calculated by using the reference and actual evapotranspiration. Results show that the reference evapotranspiration calculated by using P-M equation is similar to that by using B-C equation, and the estimation calculated by using P-T equation is obviously lower than that of others. The crop coefficients calculated by using three equations are also significant different, and it is suitable using P-M equation and using B-C equation during April to October according to the annual change of crop coefficient. However, the crop coefficient calculated by using P-T equation is remarkably higher than that of others. The irrigation demands were also estimated based on the crop water requirements and rainfall which were significant different in difference rainfall years. The irrigation demands range is from 270 mm to 400 mm and 0 to 330 mm for winter wheat and summer maize, respectively.

Key words: piedmont of Taihang Mountain; reference evapotranspiration; actual evapotranspiration; crop irrigation demands