

陇东南干旱区农田土壤水分蒸散变化特征

杨小利^{1,2}, 姚小英³, 蒲金涌⁴

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,

中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘肃省平凉市气象局, 甘肃 平凉 744000;

3. 甘肃省天水市气象局, 甘肃 天水 741000; 4. 甘肃省天水农业气象试验站, 甘肃 天水 741020)

摘要: 用 Peman 公式计算了 20 世纪 60~90 年代陇东南旱作区农田 40 a 潜在蒸散值, 分析了潜在蒸散的时空变化并与蒸发器实测值进行比较。结果表明: 潜在蒸散值受气温、降水的支配比较大, 80 年代最小, 其次为 70、60 年代, 90 年代增幅最大, 其中关山区增幅最为明显; 90 年代各地各季潜在蒸散值均达到高值点, 其中夏季最高, 冬季最小; 潜在蒸散量与实测蒸发量变化趋势基本一致; 60~90 年代各地平均年潜在蒸散值比实测值高 30% 左右, 其中春、夏、秋三季潜在蒸散均大于蒸发器所测值, 以夏季相差最大, 达 50% 左右, 冬季潜在蒸散则小于蒸发器所测值; 90 年代以来, 各地土壤水分亏缺值增多, 尤以春季亏缺最多, 对作物生长影响较大。

关键词: 陇东南干旱区; 土壤水; 蒸散发; 变化特征

中图分类号: S152.7*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0014-05

水汽蒸散是陇东南旱作田土壤运行的主要环节之一, 土壤纳接了大气降水之后, 除很少一部分渗透到土壤深层外, 绝大部分的水分通过蒸发及作物的蒸腾进入大气完成土壤水分循环的最后过程, 实现土壤水的再循环。姚小英等^[1]曾就甘肃黄土高原土壤蒸散特征做过研究。陇东南旱作区作为雨养农业区, 其农田土壤水分的贮存、蒸散及含量高低, 直接影响着作物生长和最终产量的形成, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 气候变暖明显, 大气降水补充量少, 土壤水分亏损严重, 干旱成为制约农业生产的主要因素。蒸散发作为一个重要的水循环要素, 是制约土壤有效水分含量的重要因子, 对该地区就此项工作的进一步研究将对指导农田水分管理和区域土壤墒情的预测研究有重要意义。

1 研究区概况

研究区选在甘肃陇东南天水市, 区内属半湿润半干旱气候带过渡区域, 境内沟壑纵横, 地貌地形比较复杂。河谷属长江、黄河两大水系, 多为雨养农业区。选取秦州、秦安、清水分别作为天水市河谷川地、渭北旱区及关山地区代表点。关山地区除西部为半湿润、半干旱区外, 大部分地方属温凉湿润区; 渭北干旱区属温带大陆性半湿润、半干旱季风气候区; 河谷川区属暖温带半湿润、半干旱气候过渡地带, 以温和半湿润区为主。观测地段土壤为沙壤土,

土层深厚, 蓄水性好, 能够代表陇东南干旱区农田土壤状况。

2 资料与方法

Peman - Monteith (P - M) 方法是一个具有物理基础的计算蒸散量的方法。该方法根据动力学原理及热力学原理, 考虑了辐射、温度、空气湿度等各项因子的综合影响。因此, FAO 推荐该方法作为估算蒸散发的唯一标准方法。本文即选择 Peman - Monteith (P - M) 方法^[2-4]计算甘肃黄土高原土壤潜在蒸散量。资料取自天水市气象局观测站 (34°57'N、105°75'E', 海拔高度: 1 141.6 m), 秦安县气象局观测站 (34°87'N、105°67', 海拔高度: 1 216.9 m), 清水县气象局观测站 (34°75'N、106°15'E', 海拔高度: 1 378.2 m), 土壤含水量资料取自天水农业气象试验站。土壤水分测定时段为土壤解冻的 3 月上旬至土壤冻结的 11 月下旬。采用土钻法进行土壤含水量的测定。测定深度为 100 cm; 每间隔 10 cm 取一次样土, 各测定 4 个重复, 计算土壤含水量 (%) [(湿土 - 干土) / 干土] 及土壤贮水量 (mm) (重量含水率 (%) × 土壤容重 × 土层厚度) 平均值。

Peman - Monteith 蒸散公式为:

$$B_E = A \times [(C - D) + F]$$

此式考虑了气压和温度随海拔高度的变化对潜在蒸散的影响, 也考虑了干旱地区干空气的平流现

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 甘肃省气象局“十人计划”项目; 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象基金 (IAM200803); 国家科技部公益行业科研专项“西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究” (200806065)

作者简介: 杨小利 (1967—), 女, 陕西凤翔人, 高级工程师, 主要从事应用气象研究及管理工作。E-mail: plyx11@126.com。

象。

式中 $A = (P_0 \times \Delta / P \times V) / (P_0 \times \Delta / P \times V + 1.00)$, 表示不同海拔高度和温度下辐射对潜在蒸散的影响。

$$\Delta = (e_a / (273 + t_a)) [6463 / (273 + t_a) - 3.927]$$
$$V = (C_p \times P) / (c \times \epsilon) = (0.242P) / [0.622(595 - 0.57t_a)]$$

$C = 0.75 \times R_a \times (a + b \times n / N)$ 表示短波辐射射入辐射对可能蒸散的影响;

$D = \delta \times Tk^4(0.56 - 0.079e_d)(0.1 + 0.9n / N)$ 表示长波辐射射出辐射对可能蒸散的影响;

$F = 0.26(1.0 + 0.72u\beta)(e_a - e_d)$ 表示该地干燥程度对可能蒸散的影响。

式中, P_0 为站点海平面平均气压; P 为本站气压; Δ 为饱和水汽压曲线斜率; V 为温度表湿度计算常数; R_a 为天文辐射; a 、 b 为系数, 分别取 0.25 及 0.45; n / N 为日照百分率; δ 为斯蒂芬波尔兹曼常数; e_a 为饱和水汽压; e_d 为实际水汽压; β 为风速订正系数; u 为气象站常规观测之风速。

在实际计算中,

$$\delta = 1.98 \times 10^{-9} \text{ cal} / (\text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{k}^4)$$
$$Tk = 273 + t_a (t_a \text{ 为测站空气温度} (^\circ\text{C}))$$
$$e_a = 33.8639 \times [(0.00738t_a + 0.8072)^8 - 0.000019 \times |1.8t_a + 48| + 0.001316]$$
$$e_d = e_a \times RH (RH \text{ 为空气相对湿度})$$

3 结果与分析

3.1 土壤蒸散发变化特征

3.1.1 潜在蒸散发变化特征 用 Peman - Monteith 公式计算了天水市各地 20 世纪 60 ~ 90 年代农田潜在蒸散值并与 40 年平均进行比较(图 1), 发现潜在蒸散值的分布与纬度关系比较密切, 随纬度的升高, 海拔高度增加, 潜在蒸散值减少, 平均值变化范围为 1 400 ~ 1 800 mm/a。60 年代最小, 其中关山区潜在蒸散值最小, 距平值为 - 101 mm, 70 年代增大, 80 年代又有所回落, 90 年代增幅明显。其中关山区增幅最大, 距平值达 140 mm。

从潜在蒸散的四季变化来看(表 1), 夏季潜在蒸散值最高, 其次为秋季、春季, 冬季最小; 各地年代变化为 90 年代一致表现为各季的高值点, 80、60 年代则为低值点。说明蒸散受气温的支配比较大, 因此在其它影响因子相对稳定的状况下, 气温升高的结果必然导致蒸散的加剧。冬季普遍大于平均值, 说明 90 年代暖冬影响较大。地域变化为河谷区增幅最大, 其中夏季 90 年代最为显著, 增幅 108.5

mm, 其次为关山区。这种变化趋势与各地 40 年来气温的增幅趋势是一致的^[5], 从而进一步说明气温对蒸散的重要影响。

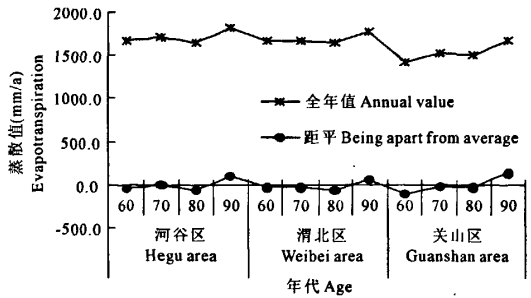


图 1 天水市各地 60 ~ 90 年代年潜在蒸散值变化
Fig.1 The variation of annual evapotranspiration of 1960s ~ 1990s in different sites of Tianshui

表 1 天水市各地 60 ~ 90 年代四季潜在蒸散值距平变化 (mm)
Table 1 The variation of evapotranspiration anomaly in four seasons of 1960s ~ 1990s in different sites of Tianshui

地点 Site	年代 Time	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
河谷区 Valley and plain area	1960s	- 5.8	- 19.3	- 19.1	- 0.2
	1970s	- 3.1	6.7	7.2	- 13.2
	1980s	- 1.2	- 8.2	- 37.2	- 13.5
	1990s	11.5	30.7	108.5	39.7
渭北区 Weibei dryland area	1960s	- 6.4	- 20.7	- 23.4	- 3.2
	1970s	- 4.2	7.8	2.8	- 5.8
	1980s	- 1.8	- 4.2	- 28.7	- 11.8
	1990s	10.7	21.8	53.4	31.9
关山区 Guanshan area	1960s	- 11.9	- 22.6	- 33.1	- 11.2
	1970s	- 1.4	- 1.3	- 8.9	- 4.9
	1980s	1.9	- 7.0	- 66.4	- 23.7
	1990s	10.9	20.8	67.9	34.5

3.1.2 小型蒸发皿实测蒸发量的变化特征 从天水市各地小型蒸发皿所测蒸发量值 40 年间变化可以看出(图 2), 实测蒸发量 40 年平均变化范围为 1 100 ~ 1 600 mm/a, 90 年代所测值明显大于平均值, 距平值为正, 其中河谷区距平值最大, 为 185 mm, 从四季变化来看(表 2), 夏季蒸发量最高, 其次为秋、春季, 冬季最小, 距平最大的是河谷区, 其次为关山区。计算的潜在蒸散量虽与实测蒸发量值相差较大, 但二者变化趋势基本一致。60 ~ 90 年代各地平均年潜在蒸散值比实测值高 30% 左右, 春、夏、秋三季潜在蒸散量大于小型蒸发器所测值, 以夏季相差最大, 达 50% 左右, 冬季潜在蒸散量则小于实测值。

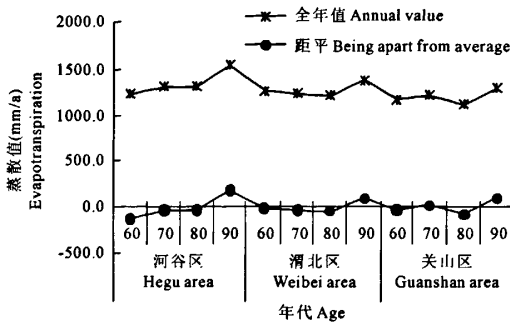


图 2 天水市各地 60~90 年代实测蒸发量变化

Fig.2 The variation of actual annual evapotranspiration of 1960s~1990s in different sites of Tianshui

表 2 天水市各地 60~90 年代四季实测蒸散值距平变化 (mm)

Fig.2 The variation of anomaly of actual evapotranspiration in four seasons of 1960s~1990s in different sites of Tianshui

地点 Site	年代 Age	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
河谷区 Valley and plain area	1960s	-7.2	-25.7	-51.5	-36.0
	1970s	-4.0	1.2	-11.8	-14.9
	1980s	-1.0	-15.7	-26.4	9.3
	1990s	8.2	40.4	89.7	41.6
渭北区 Weiwei dryland area	1960s	3.2	14.4	-8.4	-15.8
	1970s	-3.3	21.6	13.6	1.0
	1980s	6.2	-33.7	-20.4	7.5
	1990s	0.4	-2.4	15.3	7.0
关山区 Guanshan area	1960s	2.2	12.6	-31.1	-20.5
	1970s	1.7	9.2	12.3	-1.4
	1980s	-8.4	-36.3	-49.3	-14.1
	1990s	5.9	19.6	65.5	33.7

3.2 作物生长季土壤水分盈亏特征评估

3.2.1 用干燥度评估土壤水分盈亏 对于土壤的水分平衡来讲,潜在蒸散与降水量的比值(E_0/R)即干燥度可表征一个地区土壤水分的盈余与亏缺状况^[6,7]。据买苗等研究^[8],农田潜在蒸散值的变化与降水密切相关,降水量越小,潜在蒸散值越大。以 80、90 年代为代表年代,分析各地作物主要生长季干燥度的变化情况。计算结果表明(图 3),各地农田作物主生长季(3~10 月)潜在蒸发力是降水量的 3~4 倍,90 年代天水市各地降水持续偏少,气温持续升高,潜在蒸散能力持续增强,蒸散能力与可供蒸散降水的比值较 80 年代明显增大,增加幅度为 0.5~1.0(图 3),以渭北区增幅最大,关山区最小。整个作物生长季 90 年代干燥度大于 80 年代。春季 3~5 月天水市各地降水变幅较大,偏少年份居多,特

别是 90 年代以来,春旱频发^[5],加之气温正处回升期,春季风力又大,故春季干燥程度 90 年代最高。此期正值冬小麦返青-抽穗期,降水量与产量正相关显著^[9],降水量的多寡对产量影响极大,为冬小麦生长需水关键期;同时 4 月又为春播关键期,故春季干燥度的加大对作物生长极为不利。夏季 6~8 月为降水的高峰期,与土壤水分的蒸发期同步,蒸发强烈,土壤失墒严重,累积贮水量最小,加之土壤水分变化幅度较大,贮水效率低。秋季 9~10 月气温下降,加之连续阴雨日数较多,蒸发力与降水量相差最小,为 2~3 倍,利于麦田土壤贮水,可为小麦播种及来年生长提供所需水分。

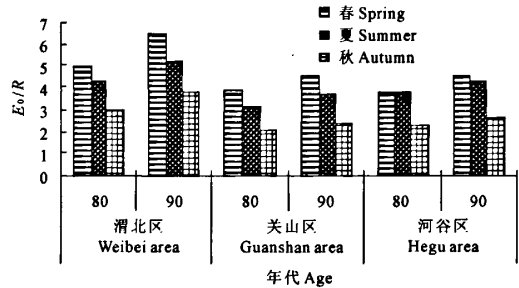


图 3 天水市各地 80 年代与 90 年代作物生长季 E_0/R 值变化

Fig.3 The variation of E_0/R of 1980s & 1990s in different sites of Tianshui

3.2.2 用降水量与潜在蒸散的差值评估土壤水分盈亏 降水量与潜在蒸散的差值($R - E_0$)标志着土壤水分对蒸散的不满足程度,降水量与潜在蒸散的差值各地 80、90 年代均为负值,夏季最大,春秋次之。各地在作物生长季均程度不同地表现出土壤水分亏缺。 $R - E_0$ 的绝对值夏季均以渭北旱区最大,80 年代达 763 mm/a,90 年代增至 865 mm/a(图 4)。可见因 90 年代气温增高,降水偏少,更加剧了土壤蒸散,农田土壤水分亏缺更为严重。

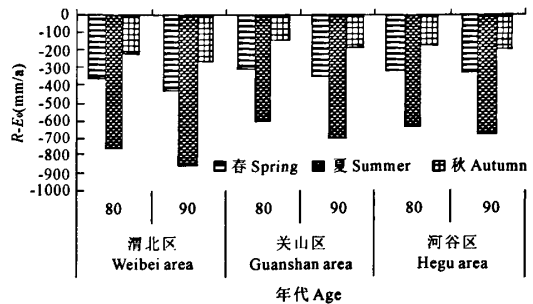


图 4 天水市各地 80 年代与 90 年代作物生长季 $R - E_0$ 值变化

Fig.4 The variation of $R - E_0$ of 1980s & 1990s in different sites of Tianshui

3.2.3 土壤含水量变化特征 降水量、气温及蒸散的变化必然导致土壤含水量的变化。以河谷区作为代表,分析 80、90 年代 0~100 cm 土层土壤含水量的变化(图 5)。可以看出,90 年代因降水量减少与气温增高同步,导致土壤含水量比 80 年代明显减少,其中 90 年代 8 月土壤含水量达到谷底值 231 mm。80 年代春、秋季土壤含水量较高,90 年代秋季含水量则最高,夏季均为土壤贮水的最低值期。

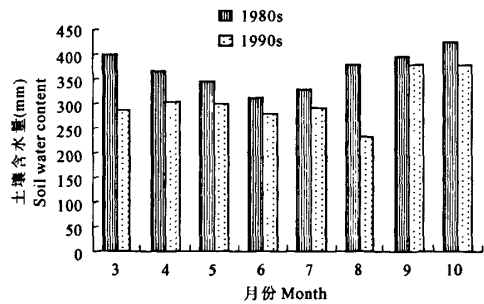


图 5 天水市作物生长季土壤含水量变化
Fig.5 The variation of soil water content during crops growing in different sites of Tianshui

4 土壤含水量预测模型

自然降水和蒸散发是影响土壤含水量的主要因子。选用布德科法计算土壤含水量值^[4]。其原理为:布德科认为,陆面的蒸散量可用热量平衡与水量平衡方程联合分析的方法确定。阿尔巴捷夫 A. M 认为^[4],当土壤湿度大于某一临界值(W_c)时,总蒸散量基本上决定于气候因素,并等于潜在蒸发,从此土壤临界湿度值开始随着土壤湿度的减少,蒸散速度迅速降低,这时蒸散速度与土壤湿度近于直线关系。因此,当土壤中有效水分降低并低于 W_k 时,蒸散量低于潜在蒸散量,并且正比于土壤有效水分含量。

$$E = E_0 \quad \text{当 } W \geq W_k \text{ 时} \tag{1}$$

$$E = \frac{E_0 W}{W_c} \quad \text{当 } W < W_k \text{ 时} \tag{2}$$

式中, W 为土壤湿度。

$$W = (W_1 + W_2)/2 \tag{3}$$

式中, W_1 、 W_2 分别为某时段内的开始和终止时的土壤含水量。

由水量平衡式可得:

$$W_2 - W_1 = R - E - f + K - N \tag{4}$$

式中, R 为降水量, f 为径流量, K 为毛管上升水, N 为渗漏量。因各地气象站占地势平坦,一年大部时间

不会产生较大径流,同时地下水位较深, f 、 K 、 N 值可忽略不计。

综合(2)、(4) 式得土壤含水量预测模式:

$$W_2 = \frac{1}{1 + \frac{E_0}{2W_k}} \left[W_1 \left(1 - \frac{E_0}{2W_k} \right) + R \right] \tag{5}$$

式中, E_0 为潜在蒸散值; W_k 值可以根据陶祖文法^[10,11] 确定, W_k 为临界含水量,对于不同性质的土壤及不同种类的作物均有一定差异,但可取近似值。在麦地苗期为: $W_k = W_h$ (10 月 ~ 3 月); 在小麦主要发育期及其后期成熟期(4 月 ~ 6 月) $W_k = 0.7 W_h$, W_h 为田间持水量。将各代表点 W_h 值(表 3)、选定各时段潜在蒸散值及相应时段降水量 R 值带入(5) 式,即可得各地该时段土壤含水量预测值。如预测 2009 年 4 月土壤 0~100 cm 含水量为 156 mm,实际预测值为 167 mm。回代检验表明,拟合效果较好。

表 3 天水市各地土壤田间持水量

Table 3 The maximum soil water content in different sites of Tianshui

地点 Site	田间持水量(10~30cm) W_h (%) The maximum soil water content(10~30 cm) W_h
河谷区 Valley and plain area	22.8
渭北区 Weibei dryland area	24.0
关山区 Guanshan area	25.5

5 结论与讨论

1) 用 Peman - Monteith 公式计算的土壤水分蒸散量变化特征表明,影响蒸散的主要因子为气温和降水。潜在蒸散的年代变化为 90 年代最大,70、60 年代次之,80 年代最小。四季变化为 90 年代为各季的高值点,80、60 年代则为低值点,以夏季最高,其次为春、秋季,冬季最小。

2) 潜在蒸散量与实测蒸发值虽在数值上差别较大,但趋势基本一致。60~90 年代各地平均年潜在蒸散值比实测值高 30% 左右,其中春、夏、秋三季潜在蒸散均大于蒸发器所测值,以夏季相差最大,达 50% 左右;冬季潜在蒸散则小于实测蒸发值。

3) 甘肃陇东南各地农田土壤水分均处于亏缺状态,夏季亏缺值最大,土壤失墒较多,贮水量最少;秋季贮水最多。90 年代以来,各地土壤水分亏缺值增多,尤以春季亏缺最多,对作物生长影响较大。

4) 土壤含水量预测模式可为进一步建立农业干旱预警系统提供依据,但因方程的建立忽略了渗漏、径流等因子的影响,方程的精准性会受到限制,故还需要在实际应用中做进一步的检验和订正。

参考文献:

- [1] 姚小英,蒲金涌,王澄海,等.甘肃黄土高原 40a 来土壤水分蒸散量变化特征[J].冰川冻土,2007,29(1):126—130.
- [2] 张世强,丁永建,卢建,等.青藏高原土壤水热过程模拟研究(Ⅲ):蒸发量、短波辐射与净辐射通量[J].冰川冻土,2005,27(5):645—647.
- [3] 王书功,康尔润,金博文,等.黑河山区草地蒸散量估算方法研究[J].冰川冻土,2003,25(5):558—565.
- [4] 曲曼丽.农业气候实习指导[M].北京:北京农业大学出版社,1990:36—39.
- [5] 姚小英,朱拥军,把多辉,天水市 45a 气候变化特征及对林果生长的影响[J].干旱地区农业研究,2008,(2):240—243.
- [6] 张新时.植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(二)—几种主要方法与 PEP 程序介绍[J].植物生态学与地植物学学报,1989a,13(3):197—207.
- [7] 张新时.植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(一)—几种主要方法与 PEP 程序介绍[J].植物生态学与地植物学学报,1989a,13(1):1—9.
- [8] 买苗,邱新法,曾艳.西部部分地区农田实际蒸散量分布特征[J].中国农业气象,2004,(4):28—32.
- [9] 蒲金涌,张存杰,姚小英,等.干旱气候对陇东南主要农作物产量影响的评估[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):169—171.
- [10] 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成.小气候和农田小气候[M].北京:农业出版社,1979:30—53.
- [11] 张秀英.定西安家沟小流域土壤水分时空分布的 GIS 辅助模拟[D].兰州:兰州大学,2003:7—10,22—25.

The variation characteristics of evapotranspiration of soil moisture in dry farmland in Southeast Gansu

YANG Xiao-li^{1,2}, YAO Xiao-ying³, PU Jin-yong⁴

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. Pingliang Meteorological Bureau, Pingliang, Gansu 744000, China; 3. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China; 4. Agrometeorological Experiment Station of Tianshui, Tianshui, Gansu 741020, China)

Abstract: Using the Peman formula, value of potential evapotranspiration in dry farmland in the southeast Gansu Province in 1960s ~ 1990s was calculated, and the spatial and temporal variation characteristics of potential evapotranspiration were analyzed, and the calculated value was compared with that measured by evaporation pan. The result showed that the value of potential evapotranspiration was mainly influenced by temperature and precipitation. The minimum value appeared in 1980s, while the maximum increasing value appeared in 1990s, especially in Guanshan area. The potential evapotranspiration reached the maximum in every season in 1990s, and summer was the highest season, while winter the smallest. The variation tendency of potential evapotranspiration and the measured one is basically consistent. The value of potential evapotranspiration was higher than the measured one by 30% during 1960s ~ 1990s, especially in summer which was higher than the measured one by about 50%, while smaller than the measured one in winter. The shortage of soil moisture increased continuously since 1990s in dry farmland, especially in spring, which had great influence on crops' growth.

Keywords: dry farmland; the southeast Gansu Province; soil water; evapotranspiration; variation characteristics