

# 绥米地区降水资源评价

## I—绥米地区降水对农作物生长适宜度的模糊分析

蒋定生 金兆森 黄国俊  
帅启富 刘梅梅 田虎旗

(中国科学院西北水土保持研究所)

### 提 要

本文根据模糊集理论,从“适量”、“适时”和“有效程度”三个指标出发,就绥米地区降水对农作物生长发育的影响提出了一种数学模型。通过计算表明,它较好地反映了本区降水资源的地域特征,为该地区农作物合理布局决策提供了科学依据。

### 前 言

陕西省的绥德、米脂等地,位于黄土丘陵沟壑区,属半干旱、半湿润气候带。年平均日照时数达2,600小时,稳定通过10℃时期的活动积温超过3,600℃。光温资源丰富,不是作物生长的限制因子。本区年平均降水量在450毫米左右,年内分配不匀,60%以上的降水集中在7、8、9三个月,作物生长关键时期降水保证率低,是影响作物稳产高产的重要因素之一。

由于降水对农作物生长发育的影响是一个十分复杂的动态过程,因而,在已往的有关研究中,很少提出该地区降水资源应以什么样的数学模型来定量描述,究其原因,除系统的复杂性而外,不确定性是很大的障碍。这种不确定性,既有随机不确定性也有模糊性。1965年,美国控制论专家Zadeh首次提出了模糊集合(Fuzzy set)的概念,开辟了一种有别于普通集合论的量化技术,这为在以模糊性为特征的科技领域内,提供了一种合适的定量描述技术。

根据这一观点,本文采用模糊集合理论来评价绥米地区的降水资源,并提出了降水对农作物生长的适宜度模型。依此对各主要农作物进行计算分析,它不仅有效地描述和刻画了降水的动态过程,也为该地区的农作物合理布局的决策提供了科学依据。

## 一、模糊子集的基本概念与诱导集

**定义1** 给定论域(讨论范围)U,所谓指定了U上的一个模糊子集 $\tilde{A}$ ,是指对任意 $u \in U$ 的元素(讨论对象),有一个隶属程度 $\mu$  ( $0 < \mu < 1$ )与之对应,称 $\mu$ 为 $\tilde{A}$ 的隶属函数,记作

$$\mu = \tilde{A}(u) \quad (1)$$

$\tilde{A}(u)$ 的值叫隶属度。表示u隶属于集 $\tilde{A}$ 的程度。当 $\tilde{A}(u)$ 仅取0, 1二值时, $\tilde{A}$ 便化为普通子集,它是模糊子集的特殊情形。

**扩张原理** 假设 $f$ 为从 $X$ 到 $Y$ 的映射,  $\widetilde{B}$ 为 $Y$ 中的模糊子集, 隶属函数为 $\mu_{\widetilde{B}}(Y)$ ; 那末,  $\widetilde{B}$ 的逆像记为 $A = f^{-1}(\widetilde{B})$ 为 $X$ 中的模糊子集, 其隶属函数定义为

$$\mu_A(x) = \mu_{\widetilde{B}}[f(x)] \quad x \in X \quad (2)$$

$A$ 也称为 $\widetilde{B}$ 的诱导集。它是1975年Zadeh提出的扩张原理的一种逆扩张。我们感兴趣的是研究同一模糊概念下诱导出来的不同模糊子集间的关系。

## 二、降水对农作物生长适宜度的评价指标及适宜度函数的确定

降水是作物水分供应与土壤水分的主要来源, 农作物生长的好坏、产量的高低与降水有着密切的关系。为了评价降水对农业生产的影响, 我们采用“适量”、“适时”与“有效程度”三个指标(或称因素)来衡量。并且引入“适宜度”的概念, 把它看作是具有模糊意义的量化指标, 藉此用来描述这种影响的动态变化过程。

所谓降水“适量”适宜度, 是指在作物整个生长发育期内所降的某一总水量, 能使作物获得最好的产量, 高于或低于这一降水量都会导致作物减产。所谓降水“适时”适宜度, 乃是指在作物各个生育期内, 能使作物获得最好产量的那一降水量的保证程度。当然, 农作物在其生长发育的不同时期, 对水分的敏感程度是不一样的。这里要特别注意对作物产量影响最大的那些关键时期(如马铃薯开花到块茎形成期)的水分供应。降水的“有效程度”适宜度, 是指降水能为土壤蓄纳和作物充分利用的程度。很显然, 认为适宜度只能取“适宜”或“不适宜”两个值是不恰当的。为了区分适宜程度的差别, 在适宜与不适宜之间引入中间值的方法是可取的。规定适宜度在隶属度区间 $[0, 1]$ 上取值, 使不同的适宜度之间可以比较大小。这类容许有中间状态存在的概念, 人们称之为模糊概念, 以别于普通集合论中的确切概念。

根据这一观点, 降水“适量”的适宜度、“适时”的适宜度、“有效程度”的适宜度等等, 都可看作是在 $[0, 1]$ 上取值的被量化的量。现在, 关键的问题在于如何确定适宜度的隶属函数。

今设降水适量 $M$ 的定义域为实数区间 $U_1 = [a_1, b_1]$ , 那末, 模糊概念“降水的量适宜”确定了 $U_1$ 上的一个模糊子集 $\widetilde{S}_1 \subset [a_1, b_1]$ 。其隶属函数为

$$\mu_{\widetilde{S}_1}: [a_1, b_1] \longrightarrow [0, 1],$$

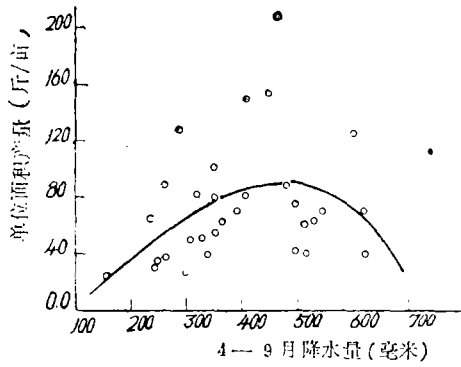
或记为

$$S_1 = S_1(M) = \mu_{\widetilde{S}_1}(M), \quad M \in U_1 \quad (3)$$

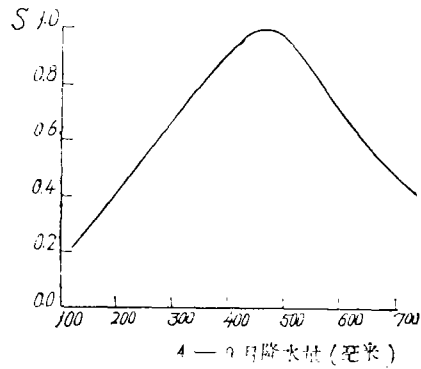
这里, 我们把隶属函数(3)叫作降水适量的适宜度曲线, 隶属度称为降水适量的适宜度。

根据有关部门的统计资料, 可以找出各种作物单位面积产量与4—9月(生育期)降水总量的关系。图1a是绥德县大豆单位面积产量与4—9月降水总量之关系图。通过图中点群的重心画一曲线, 则可看出, 在现有生产技术水平条件下, 当降水量为475毫米时, 大豆能获得比较好的收成。依此不难作出降水适量的适宜度曲线(图1b)。

但是, 考虑到生产技术水平的不断发展, 我们采用根据彭曼公式计算出来的作物需水量作为适宜水量标准。因为根据联合国世界粮农组织对作物需水量所下的定义是: “在一定的生长环境下, 供应作物蒸腾和蒸发损失所需的水分, 以深度计。此作物生长在大田之中, 无病虫害现象, 土壤水分和肥料不受限制, 能够达到高产。”依此, 降水适量的隶属函数, 可近似表示为



a、大豆单产与4—9月降水量的关系



b、降水适量的适宜度曲线

图 1、降水“适量”对大豆单产的适宜度曲线

$$\mu_{s_1}(M) = \begin{cases} Ae^{-Bm/m_1} & (\frac{m}{m_1} \geq 1) \\ \frac{m}{m_1} & (0 < \frac{m}{m_1} < 1) \end{cases} \quad (4)$$

式中：m—天然降水量，毫米；

$m_1$ —作物需水量，毫米；

A, B—待定系数，与作物品种、生育期有关。

同理 模糊概念“降水的时期适宜”，“降水的有效程度适宜”确定了相应的模糊子集  $\tilde{S}_2 \subset U_2 = [a_2, b_2]$ ,  $\tilde{S}_3 \subset U_3 = [a_3, b_3]$ 。它们的适宜度曲线分别记为

$$S_2 = \tilde{S}_2(T) = \mu_{s_2}(T) \quad T \in U_2 \quad (5)$$

$$S_3 = \tilde{S}_3(E) = \mu_{s_3}(E) \quad E \in U_3 \quad (6)$$

其函数值分别为降水的时期T的适宜度，和降水的有效程度E的适宜度。

降水适时包含有两方面的内容，一是在各生育期内（尤其是作物需水临界期）降水的量恰到好处，能使作物高产；二是这种降水量保证率的大小。通过对各种作物各个生育期内降水与单位面积产量关系的统计分析，可以作出生育期内累积降水量对产量影响的曲线（图2），显然，这里存在一个能使作物获得较好收成的降水区域（曲线峰值左右）。如果在此区间内分布的降水次数多，那末降水的保证率也就高，亦即降水适时的隶属程度高。若将图2a中的横座标划分为20毫米一个个小区间，把落于各个区间内的点子的纵座标值平均，得数值 $Y_i$ ，称之为区间单产平均值，该值与多年平均产量 $Y$ 之比值 $\geq 0.9$ 所围成的区域，称为降水适时区。据此，降水适时的隶属函数可定义为

$$\mu_{s_2}(T) = \frac{n_1}{n} \quad (7)$$

式中： $n_1$ —降水适时区间内的降水年数；

n—资料统计年数。

降水的有效性，考虑了两个因素：一是无效降水损失，另一为径流损失。粗略地把 $\leq 5$ 毫米的日降水量归为无效降水，因为这种降水一部分被作物茎叶截留而直接蒸发，另一部分仅起打湿地皮的作用，不能形成土壤水。降雨径流的大小与许多因子有关，十分复杂。根据黄河水利委员会

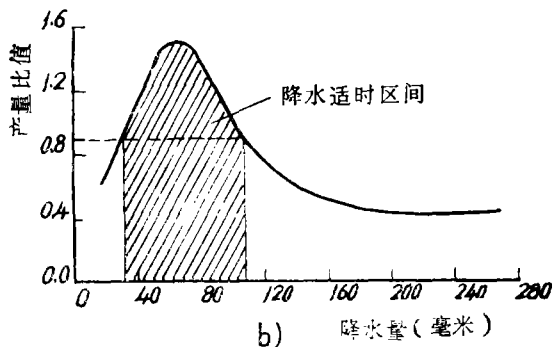
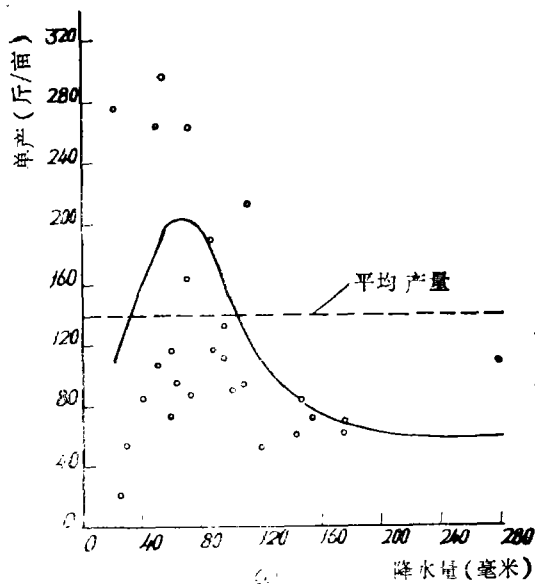


图2. 马铃薯淀粉积累期降水量与产量的关系

与榆林地区水电局的统计分析, 绥米地区多年平均径流总量约为50毫米。黄委绥德水土保持试验站在韭园沟的观测表明, 在19年157次产流降水中, 7—9月发生142次, 占90%。我们近似地认为, 本区径流仅产生于4—9月, 并以图3作为年径流分配的结构框架, 用下式来计算降水的有效程度隶属度

$$\mu_{s_3}(E) = \frac{m - m_2 - m_3}{m} \quad (8)$$

式中:  $m$ —降水量, 毫米;  
 $m_2$ — $5 \leq$ 毫米无效降水量, 毫米;  
 $m_3$ —径流量, 毫米。

绥米地区多年平均无效降水与径流分配情况列于表1。

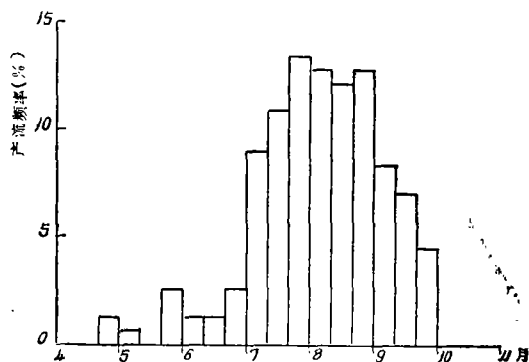


图3 绥德韭园沟流域4—9月产流时程分配直方图

表1 绥米地区 $\leq 5$ 毫米无效降水及年径流逐旬分配表

月	一			二			三			四			五			六		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
$\leq 5$ 毫米降水(毫米)	0.4	0.9	0.9	1.1	0.9	1.0	2.0	1.5	2.6	2.5	1.5	1.9	2.4	1.9	2.4	1.8	2.0	2.8
径流(毫米)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.64	0.32	0	1.28	0.64	0.64	1.28	
月	七			八			九			十			十一			十二		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
$\leq 5$ 毫米降水(毫米)	4.4	4.0	3.7	2.5	3.8	6.0	3.7	2.9	2.9	1.7	2.2	2.3	2.1	1.4	1.7	0.6	0.6	0.4
径流(毫米)	4.47	5.41	6.69	6.38	6.05	6.38	4.14	3.50	2.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 三、降水资源指标的适宜态

降水的量、降水的时期和降水的有效程度等，都是随时间变化的动态过程。它们对作物的影响也随时间而变化，这些影响可以表示成适宜度随时间的变化过程。可把这个过程简称为降水资源评价指标的适宜态。它是时间 $t$ 上的模糊子集。这些模糊子集可由前边提出的扩张原理诱导出来。

我们把时间的参考集取成作物整个生育期的时间间隔，记为 $[0, t_0]$ ，并以旬作为时间单位。下面，我们首先讨论降水的量适宜态的确定。

设若对本区的某一作物而言，降水的量在其整个生育期 $[0, t_0]$ 内的变化过程

$$M = M(t), \quad t \in [0, t_0] \quad (9)$$

为已知时， $M$ 表示从 $[0, t_0]$ 到 $U_1$ 的一映射，又 $S_1 \subset U_1$ 。由前边的扩张原理知， $S_1$ 的逆像 $M^{-1}(S_1)$ 是 $[0, t_0]$ 的模糊子集，记作 $S_M$ ，它的隶属函数由下式确定

$$\mu_{S_M}(t) = M \cdot S_1(t) = S_1[M(t)], \quad t \in [0, t_0]$$

简记为 $S_M(t)$ 。它表示本地的降水的量对作物生长的适宜过程，即降水量的适宜度随时间变化在全生育期内的变化过程——降水的量的适宜态。采用模糊集中常用的记号，把连续过程记为

$$S_M = \int_{[0, t_0]} S_M(t)/t = \int_{[0, t_0]} S_1(M(t))/t \quad (10a)$$

把离散过程记为

$$S_M = \sum_{i=1}^n \frac{S_M(t_i)}{t_i} = \sum_{i=1}^n S_1(M(t_i))/t_i \quad (10b)$$

同理，若降水的时期和降水的有效程度的全生育期内变化过程 $T(t)$ ， $E(t)$ 为已知时，分别通过模糊子集 $S_2$ ， $S_3$ 应用扩张原理可以诱导出降水的时期的适宜态和降水的有效程度的适宜态。它们都是时间间隔 $[0, t_0]$ 上的模糊子集。对连续过程分别为

$$S_T = \int_{[0, t_0]} S_T(t)/t = \int_{[0, t_0]} S_2[T(t)]/t \quad (11a)$$

$$S_E = \int_{[0, t_0]} S_E(t)/t = \int_{[0, t_0]} S_3[E(t)]/t \quad (12a)$$

离散过程分别为

$$S_T = \sum_{i=1}^n \frac{S_T(t_i)}{t_i} = \sum_{i=1}^n \frac{S_2[T(t_i)]}{t_i} \quad (11b)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^n \frac{S_E(t_i)}{t_i} = \sum_{i=1}^n \frac{S_3[E(t_i)]}{t_i} \quad (12b)$$

它们分别表示降水的时期和降水的有效程度对作物生长的适宜度的全生育期内变化过程。

### 四、评价降水资源的一种数学模型

降水资源的数学模型应能反应降水在量、时期、有效程度三因素方面配合起来的总体效能。由于适宜态 $S_M$ ， $S_T$ 及 $S_E$ 都是 $[0, t_0]$ 上的模糊子集，其总体效能 $S_C$ 亦应是 $[0, t_0]$ 上的模

糊子集, 并且 $S_c$ 可看作是 $S_M, S_T, S_R$ 的交集, 即 $S_c \cong S_M \cap S_T \cap S_R$ , 亦即降水资源的适宜态为降水资源各因素的适宜态的逻辑乘。依此, 可以得到降水资源的效能模型

$$S_c \cong \int_{[0, t_0]} S_M(t) \cap S_T(t) \cap S_R(t) / t \quad (13a)$$

或

$$S_c \cong \sum_{i=1}^n \frac{S_M(t_i) \cap S_T(t_i) \cap S_R(t_i)}{t_i} \quad (13b)$$

这一模型反映了降水资源各因素对作物生长控制的实际效能, 它在降水资源评价中, 有着很重要的作用。

我们把指标

$$C_o = \frac{1}{n} \int_0^{t_0} S_M(t) \cap S_T(t) \cap S_R(t) dt \quad (14)$$

称为降水资源的单位效能指数, 或简称单位效能指数。式中 $n$ 为作物全生育期旬数。因此, 该式表示全生育期内降水资源的旬平均适宜度。

## 五、绥米地区主要农作物的降水资源的效能指数计算

为了验证模型, 我们选择了小麦、高粱、玉米(不灌水, 旱地种植)、大豆、马铃薯、谷子、糜子等主要农作物进行实例分析, 用离散模型(13b), 取旬为单位计算, 将结果绘成连续曲线(图4), 以便能够直观地看出适宜度的变化过程。

在图4中, 对每一种作物我们都绘出它们的降水的量、降水的时期和降水的有效程度的适宜态, 其下缘部分就是效能模型。

已算出绥米地区主要农作物的降水资源的单位效能指数如表2。可以看出, 在7种作物中, 以糜子的降水效能指数最高, 达0.65; 小麦的降水效能指数最小, 仅及0.36。因此, 在本区的山坡旱地上, 种植糜子、谷子、马铃薯和大豆这类抗逆性强的作物比较适宜, 收成比较稳定可靠; 而诸如小麦、玉米、高粱这类作物最好安排在水分条件较好的川水地上, 方能获得比较理想的收成。上述计算结果与本区传统的作物布局方式甚为吻合。

表2 主要农作物的降水单位效能指数

作物	小麦	玉米	高粱	大豆	马铃薯	谷子	糜子
旬平均降水资源效能指数	0.36	0.44	0.46	0.49	0.51	0.57	0.65

分析图4中的适宜度曲线, 大抵可分为三类:

**第一类,** 降水的适量因素是限制因子, 譬如小麦、玉米等。在这些作物的一些水分关键期(如小麦的拔节、孕穗、抽穗; 玉米的拔节、抽穗期等), 降水的量不足, 作物需水量比降水量大得多, 处于干旱状态, 严重影响作物正常生长发育, 因而不能获得高产。改变这种状况只有灌水补充, 或者是改变栽培环境, 譬如提倡小麦下川。

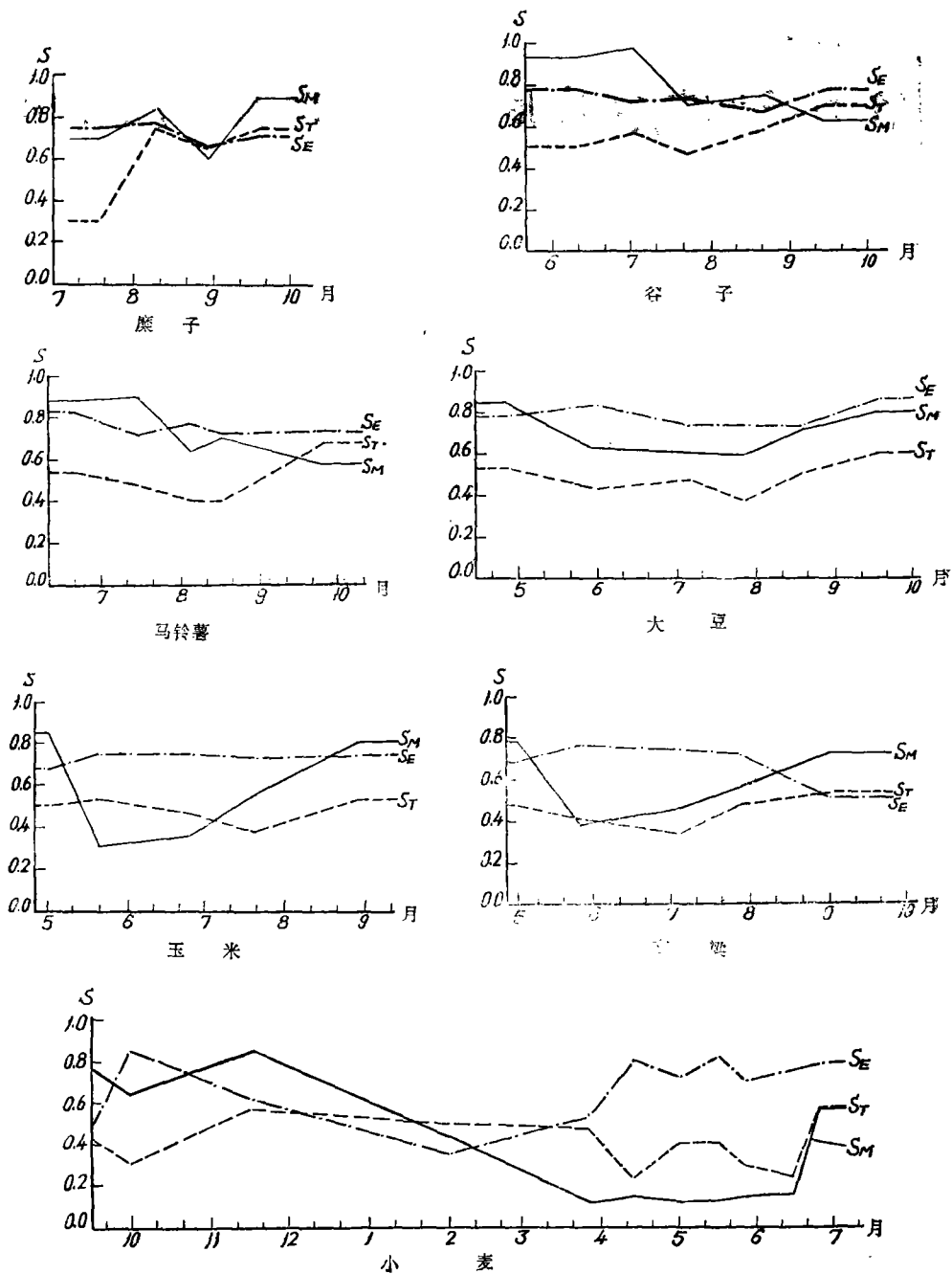


图4. 绥米地区降水资源对主要农作物的适宜度曲线

**第二类**，降水的适时因素是限制因子，如谷子、大豆、马铃薯和高粱等。在这些作物的各个生育期内，能使作物获得较好收成的最佳降水量的保证率偏低，这是这些作物产量不稳定的重要原因之一。

**第三类**，限制因子属于“适量”、“适时”和“有效程度”三方面，如糜子。

# 量算沟道切割密度底图的选择及精度评价

徐 国 礼

(中国科学院西北水土保持研究所)

## 提 要

本文采用1/10,000和1/50,000航测地形图(以下简称航测图),1/33,000—1/38,000(简称1/33,000)航片及实测(拐沟)沟道图,分别量算杏子河流域最大的23条小流域、纸坊沟小流域及拐沟的沟道切割密度。以实测值为100%,则前三种航测资料的量算值与实测值之比,依次为98%、46%、96%。结果表明,1/10,000航测图量算值,接近于实测值,可作为该区量算切割密度的最佳底图;1/33,000航片的量算值,加上修正值+4%,接近1/10,000航测图量算值,可作该区的补充底图;1/50,000航测图的量算值,小于实测值的50%,不宜作该区量算沟道切割密度的底图。

## 一、问题的提出

根据我国土壤侵蚀学、侵蚀地貌学及水土保持有关学科学者的共同看法,黄土丘陵区沟道切割密度,系指流域沟道(切沟、冲沟、河沟)总长度与其流域面积之比。

目前,国内一般文献所采用该区各类型区的沟道切割密度值与实际相差很大,可靠性小于50%,不能反映该区沟道切割密度的真实变化——这些数值大部分系黄河考察队在老1/50,000地形图上量取的(因当时缺乏更大比例尺的地形图)。1/50,000地形图比例尺较小,图面容量有限,地形碎部经过综合取舍,几乎所有的切沟和小冲沟无法在该比例尺图上表示。因此,在没有切沟和小冲沟的地形图上量取包括切沟和小冲沟的沟道切割密度,这显然是不符合实际的。

随着各门学科的发展,国内测绘工作也向前推进,采用过去(解放前)1/50,000地形图量算的沟道切割密度资料,已不能满足现代水土保持及土壤侵蚀规律深入研究的要求。因此,必须选择新的测绘资料,使该区沟道切割密度量算值,更富于科学性、可靠性和真实性,才能准确地反映该区各类型区沟道切割密度的真实变化及精度的统一性。然而,如何使该区量算沟道切割密度

## 结 语

降水的适宜度模型能比较全面地反映降水与农作物生长的相互关系,有效地刻画了降水特性的全过程。它是评价降水资源量化分析的一个比较好的方法。

根据模型计算出来的结果,为本区农作物布局的决策提供了科学依据。

今后,如能和光、温等农业气候资源一并进行分析,可作出农作物适宜生长区域图。这是一件很有价值的工作。