

# 机修梯田优化设计方法研究

周孚明

(甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730021)

**摘要:** 通过在甘肃省庆阳市西峰区吴庄塬坡地机修试验点和正宁县宋畔沟壑坡面机修试验点的定位试验和验证分析, 探索出了推土机修筑连台梯田规划优化设计方法中, 满足人工筑埂坎少用工、埂坎少占地、便利机械耕种作业和梯田稳固 4 个目标的多变量、非线性的简化数学模型; 构建了机修工程量、工作量综合计量的物理量, 即“土方加权运输量——土工量”, 并且得出了相应的计算模型。上述的研究成果在黄土高原世行贷款甘肃马莲河水水土保持项目一期工程区——甘肃庆阳市 6 县(区)进行了推广应用, 皆取得了良好的效果。

**关键词:** 机修梯田; 优化设计; 试验研究; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)04-0065-03

中图分类号: S157

## On Optimized Design for Mechanized Terracing

ZHOU Fu-ming

(Gansu Institute of Soil and Water Conservation, Lanzhou 730020, Gansu Province, China)

**Abstract:** Through locating experiment and verification analyses conducted in pilot research sites for mechanized terracing in Wuzhuangyuan plateau slopes of Xifeng District and Songpan gully sides in Zhengning County, Xifeng City, a simplified mathematic model of multiple varieties and non-linear is concluded for planning bulldozer terracing, that satisfies four targets: the less consumption of labor force, less quantity of terrace edge, more convenient for mechanized farming, and stable terrace. An earth-labor value with relevant models is established for calculation, namely, work quantity and weighted average-quantity of earth transportation. The output has been extended throughout the 6 counties/city of the project area of Gansu Component of China Loess Plateau Watershed Rehabilitation Project I, and achieved good effects.

**Keywords:** mechanized terracing; optimized design; experiment and research; the Loess Plateau

坡耕地梯田化是一项重要的水土保持措施, 其工程量大、面广、分散、时长, 采用推土机修梯田, 无疑将加快梯田建设的速度, 因而开展机修梯田优化设计方法的研究, 具有重要的现实意义。

## 1 试验研究内容

(1) 梯田机修优化设计。坡改梯在不同坡度、施工条件、生态条件下其田块规格尺寸即梯田的田面宽、田坎高、田坎外侧边坡角等指标的确定; 在同一立地条件下, 梯田规格尺寸效益最佳的优化组合方案。

(2) 机修梯田效率评估。机械修梯田中的主要机械是推土机, 与人工修筑相比, 机修的特点和效果、机修对各种地形的适应性。

(3) 机修梯田的施工组织。机修工程量、所需台班数、辅助人工工日的准确计算; 机修梯田一个施工区规模; 所需机械数量等。

## 2 研究过程

在黄土高原水土保持世行贷款甘肃庆阳市马莲河项目区, 选定西峰区陈户乡吴庄村塬边  $6 \text{ hm}^2$  塬坡地作为塬地机修类型区试验点(简称吴庄点), 选定正宁县西坡乡宋畔村范围约  $20 \text{ hm}^2$  沟壑坡耕地作为沟壑坡面机修类型区试验点(简称宋畔点), 然后分别进行了现场测量、设计放线、施工。对试验研究资料进行了分析, 提出了研究成果报告, 并在项目区示范推广验证, 效果良好。

## 3 试验研究结果分析

### 3.1 开发机修梯田优化设计数学模型

机修梯田的优化设计主要是指田面宽度( $B$ )、田坎高度( $H$ )及田坎外侧坡角( $\beta$ )的设计, 这些都是决策变量。而田块长度( $L$ )的设计视具体地形、地物条

件而定,是一固定的值,即作为参变量对待,图 1 为机修梯田优化设计断面图。

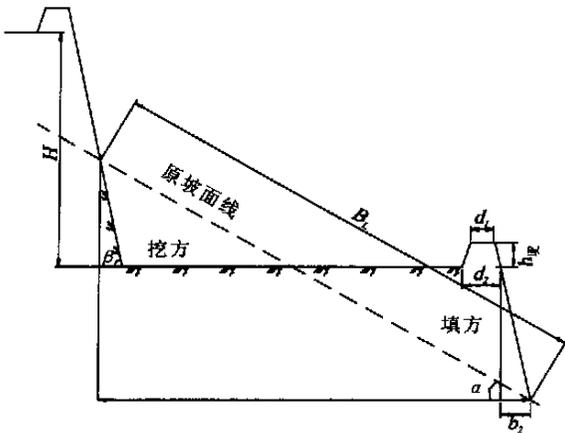


图 1 机修梯田优化设计断面图

机修梯田的优化设计是要求所设计修筑的梯田同时满足修筑少用工,埂坎少占地,便利机械作业,梯田稳固 4 个目标。

### 3.1.1 建立四个目标的目标函数

#### (1) 梯田稳固,安全第一。

① 埂坎设计:一般采用定型尺寸设计,安全系数  $K \geq 1.2$ 。

$$\text{墙体总高: } h_{\text{墙}} = H/2 + h_{\text{埂}} + h_{\text{基}} \quad (1)$$

式中:  $H$  ——连台梯田田坎高,为平均挖方高度加平均填方高度(m);  $h_{\text{埂}}$  ——田埂在田坎上方超出田平面的高度,一般取 0.2~0.3 m;  $h_{\text{基}}$  ——田坎下清基开槽深度,一般取 0.2 m。

田埂上宽  $d_1$  为 0.3~0.4 m,田埂下宽  $d_2$  为 0.4~0.5 m。

修筑田坎的下宽为:

$$d_3 = h_{\text{墙}} \cot \beta + d_1 \quad (2)$$

式中:  $\beta$  ——田坎外侧坡角。

根据土坡极限平衡稳定边坡曲滑动面图解,用回归方程拟合曲线簇<sup>[3]</sup>,得:

$$\text{ctg } \beta = (0.001(\sqrt{H/c})2.29) / \tan^{1.32} \varphi \quad (3)$$

(复相关系数  $R = 0.9210$ )

式中:  $\gamma$  ——田坎土体天然容重( $t/m^3$ );  $c$  ——田坎土体粘聚力( $t/m^2$ );  $\varphi$  ——田坎土体内摩擦角( $^\circ$ )。

安全系数  $K$  取 1.2,用  $c/1.2$ ,  $\varphi/1.2$  分别代替(3)式中的  $c$ ,  $\varphi$ 。根据甘肃黄土高原地区的调查<sup>[1]</sup>,土体天然容重  $\gamma = 1.2 \sim 1.5 t/m^3$ ,土体粘聚力  $c = 0.6 \sim 1.4 t/m^2$ ,土体内摩擦角  $\varphi = 18^\circ \sim 30^\circ$ 。

#### ④梯田田埂田坎修筑长度:

$$L_{\text{墙}} = (B + L) \quad (4)$$

式中:  $B$  ——田面毛宽(m);  $L$  ——田面长(m)。

#### (2) 埂坎少占地。

主要讨论占坡改梯非生产性用地 90% 以上的正向埂坎占地问题<sup>[2]</sup>。

$$\text{埂坎占地比例: } N = (d_2 + b_2)/B \quad (5)$$

式中:  $d_2$  ——田埂下宽(m);  $b_2$  ——田坎在水平面的投影占地宽(m)。

根据甘肃黄土高原地区的调查<sup>[1]</sup>,胁边宽度  $d_2$  在 1~1.2 m。

$$b_2 = H \cot \beta \quad (6)$$

#### (3) 机修梯田少用工。

推土机修梯田可一次完成挖、装、运、卸土方工作量,而土方工程量可用土方运输量来量度,即土方量和平均运距的乘积,用  $A'$  表示,单位为  $m^3 \cdot km$ ,每公顷梯田土方运输量

$$A' = 0.825HB \quad (m^3 \cdot km) \quad (7)$$

$H, B$  意义同前。

每  $1 \text{ hm}^2$  梯田埂坎土方:

$$G = (H/2 + h_{\text{墙}} + h_{\text{基}})(d_1 + (H/4 + (h_{\text{墙}} + h_{\text{基}})/2) \cot \beta)(L + B)10000/(B + L) \quad (8)$$

#### (4) 梯田便利耕种机械作业。

据试验影响机械作业效率主要因素是田长,而田长在一定条件下取定值。故可供选择的因素为田宽,田面越宽越便于机械作业。如东方红 12 带作业机具能回转的田面宽 4 m 以上可满足机械作业。

### 3.1.2 田块横断面优化设计的综合模型(模型 1)

梯田稳固目标以安全系数  $K \geq 1.2$  设计来解决;便利机械作业目标采用田面宽  $B \geq 4 \text{ m}$  来满足;对于修筑少用工和埂坎少占地问题,经对修筑用工和埂坎占地问题统一在梯田每公顷和整个经济计算期 50 a 的加权处理,将多目标化成单目标,构造梯田修筑费用和埂坎占地损失的单一损失目标函数。

$$U = P_1 0.825HB + P_2 (H/2 + h_{\text{墙}} + h_{\text{基}})(d_1 + (H/4 + (h_{\text{墙}} + h_{\text{基}})/2) \text{ctg } \beta)(L + B) \times 10000/(B + L) + P_3 N(d_2 + b_2)/B = \min \quad (9)$$

使  $U$  值取极小值的  $H, B$  为优化方案。

### 3.2 定义综合反映机修梯田土方运输量的物理量——土工量(A)

机修梯田的土方运输量用货物运输( $t \cdot km$ )表示。根据土壤容重将运送土方的重量换算成土方的体积( $m^3$ )。每  $1 \text{ hm}^2$  土方量  $V$  为

$$V = 1250H \quad (m^3) \quad (10)$$

式中:  $H$  ——连台梯田上下田面平均高程的高差(田坎高, m)。

均匀坡面上梯田土方平均运距(km)为

$$L = (2/3)B \quad (11)$$

每 1 hm<sup>2</sup> 梯田土方运输量:

$$A' = V \cdot L = 0.825HB \text{ (m}^3 \cdot \text{km)} \quad (12)$$

根据经验, 当机修梯田坡度为中位数(10°), 田宽为 20m 时, 机械发挥效率最佳。

$$A = 3.75HB^{0.5} \text{ (m}^3 \cdot \text{km)} \quad (13)$$

式中:  $A$  ——1 hm<sup>2</sup> 土方加权运输量(m<sup>3</sup>·km), 简称土工量。

### 3.2.1 田块横断面优化设计的简化模型(模型 2)

把  $A$  作为梯田优化设计的重要参变量, 在同一

类型区的不同坡度, 给定相等的  $A$  值。

根据式(13) 得

$$B = (0.267A \cot \alpha) / 3 \quad (14)$$

式中:  $B$  —— 田面毛宽(m);  $\alpha$  —— 修梯田原地面坡角(°);  $A$  ——1 hm<sup>2</sup> 土方加权运输量(m<sup>3</sup>·km)。

$A$  在不同的类型区取不同的值: 干旱地区取  $A = 4$ , 湿润地区取  $A = 3$ , 介于二者之间者取  $A = 3 \sim 4$ (表 1)。

利用上述优化设计对吴庄和宋畔两个试验点的评判结果见表 2。

表 1 不同  $A$  值、不同坡度条件下机修梯田优化横断面设计

$\alpha/(\circ)$	3			3.5			4		
	$H$	$\beta$	$B$	$H$	$\beta$	$B$	$H$	$\beta$	$B$
3	1.96	87.3	37.43	2.17	86.6	41.48	2.38	85.8	45.34
5	2.33	85.6	26.60	2.58	84.9	29.48	2.82	83.9	32.22
10	2.94	83.3	16.67	3.26	81.5	18.48	3.56	79.6	20.19
15	3.38	80.8	12.61	3.75	78.3	13.98	4.09	75.9	15.28

表 2 吴庄和宋畔二试验点评判结果

试验点	田片号	$\alpha/(\circ)$	$A/(\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-1})$	$B_{\text{总}}/m$	$B_{\text{优}}/m$	$N_{\text{优}}/台$	$N_{\text{实}}/台$	验收结果
吴庄	iv	3.28	3.5	102.83	39.1	2.63	3	合理
	㊸	2.15	3.5	148.8	51.81	2.87	3	合理
	㊹	3.10	3.5	121.7	40.58	3.00	3	合理
	iv	13.26	4.0	124.7	16.64	7.49	7	合理
宋畔	㊸	8.42	4.0	251	23.00	10.90	10	三角地扩宽, 较合理
	㊹	12.10	4.0	150.5	18.00	8.38	8	合理
	㊺	10.55	4.0	59.57	19.46	3.06	3	合理
	v	7.84	4.0	185.38	23.30	7.94	9	与旧梯田衔接, 田块零碎, 较合理

注:  $B_{\text{总}}$  —— 基线总水平宽;  $B_{\text{优}}$  —— 优化田面宽;  $N_{\text{优}}$  —— 优化台数;  $N_{\text{实}}$  —— 实修台数。

### 3.2.2 机修梯田推运土方计费的规一化指标

每 1 hm<sup>2</sup> 梯田的机修付费

$$F = P_1(3.75HB^{0.5})K \quad (15)$$

式中:  $F$  —— 每 1 hm<sup>2</sup> 梯田机修费用(元);  $H$  —— 田坎高(m);  $B$  —— 田面宽(m);  $P_1$  —— 1 m<sup>3</sup>/km 的单价;  $K$  —— 依土质和斜向调土比例而定的土方运输量修正系数( $K \geq 1$ )。

### 3.2.3 评价机修梯田宽度等级的重要指标( $A$ )

$A > 6$  为过宽田面型;  $A \geq 4$  为宽田面型;  $3 < A < 4$  为中间型;  $A \leq 3$  为窄田面型;  $A < 2$  为过窄田面型。

### 3.3 机修梯田工程量、工作量计算

每块地的土工量

$$A_{\text{块}} = 3.75HB^{0.5}S \text{ (m}^3 \cdot \text{km)} \quad (16)$$

式中:  $S$  —— 田块面积(hm<sup>2</sup>)。

每 1 hm<sup>2</sup> 梯田埂坎土方

$$G = (H/2 + 0.4)(0.3 + (H/4 + 0.2)0.01H^{2.29})(L + B) \times 10000 / (B + L) \quad (17)$$

每 1 hm<sup>2</sup> 梯田埂坎修筑用工

$$W = EG \quad (18)$$

式中:  $E$  —— 修筑 1 m<sup>3</sup> 埂坎所需工日。用双面椽帮埝施工时,  $E = 0.6 \sim 0.8$  工日/m<sup>3</sup>; 用单面椽帮埝施工时,  $E = 0.3 \sim 0.4$  工日/m<sup>3</sup>。

### 3.4 梯田机修工区规模

根据试验示范经验, 一个工区集中的机械至少在 3 台以上, 每台班修梯田按 0.067 hm<sup>2</sup> 计, 机修梯田工区规模应在 33~ 333 hm<sup>2</sup> 之间为宜。

(1) 提出推土机修筑连台梯田设计中兼顾机械修筑和人工筑埂坎少用工, 少占地, 便利机械耕种作业, 梯田稳固 4 个目标的多变量、非线性数学模型。

(下转第 33 页)

壤、土地利用和水土保持等多种因素的影响,故侵蚀力的空间分布与实际土壤流失的状况并不完全一致。降雨侵蚀力的年内分配与植被覆盖季节变化的配合状况对土壤侵蚀有重大影响,利用黄土高原17个气象站1965—1979年日雨量及日10 min最大雨强资料得出半月侵蚀力占年侵蚀力的累积频率表,为土壤侵蚀方程中 $K$ 因子和 $C$ 因子的计算提供依据。侵蚀力年内分配集中度指标反映,黄土高原多年平均 $R$ 值年内分配集中度很高,且多集中在6—9月。

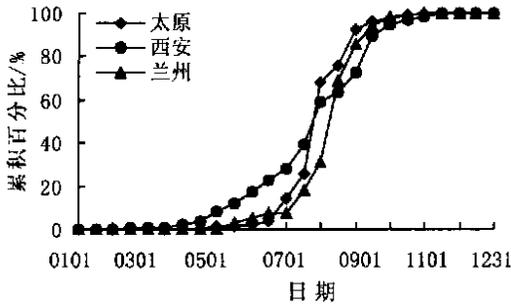


图2 代表站点半月 $R$ 值占年平均 $R$ 值的累积频率图

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 中华人民共和国水利部. 全国水土流失公告[M]. 2002. 16.
- [2] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990, 1(19): 80—83.
- [3] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb. 1978. No. 537. 5—6
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A et al. Predicting Soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 703. 1997, 87(165): 19—64.
- [5] 贾志军. 晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 $R$ 值的确定[J]. 中国水土保持, 1987(6): 18—20.
- [6] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力 $R$ 指标的研究[J]. 中国水土保持, 1987(12): 34—40.
- [7] 江忠善, 贾志伟, 等. 降雨特性与水土流失关系的研究[A]. 西北水土保持研究所集刊, 1990(12): 1—3.
- [8] 贾西安, 等. 黄河中游地区降雨侵蚀力 $R$ 值的初步研究计算[J]. 水土保持试验研究成果汇编第三集, 西峰水土保持站, 1992. 73—77.
- [9] 杨开宝, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标的研究[J]. 黄土丘陵水土保持与农业综合发展研究, 西安地图出版社, 1993. 108—118.
- [10] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 122—136.
- [11] 伍育鹏, 谢云. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 31—34.
- [12] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理·总论[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 249.
- [13] 陈永宗, 景可, 等. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [14] 国家教委委员会中国综合自然区划协作组. 中国自然区域及开发整治[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 163.
- [15] Yu, B, Rosewell C J. A robust estimator of the  $R$ -factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 559—561.
- [16] 付金生, 章文波. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35—41.
- [17] 王广德, 过常龄. “Krig”空间内插方法在地理学中的应用[J]. 地理学报, 1987, 42(4): 366—374.
- [18] 章文波, 谢云. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33—40.
- [19] 谢云, 章文波. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 53—56.
- [20] 刘宝元, 谢云, 等. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 81—88.

(上接第67页)

(2) 构建机修工程量、工作量综合计量的物理量——“土方加权运输量——土工量”(A), 建立了兼顾前述4个目标的优化设计简化数学模型, 可方便计算出该类型区不同坡度的优化设计方案; 再者A值是计算推土机推运土方费用的规一化计费标准, 比传统的按面积、按土方量和按土方量结合分段运距的计费方法简便、准确、适用。

(3) 提出了机修工程量、需台班数、埂坎修筑量、需人工数的计算式, 测定了梯田机修的效率参数, 一个台班的机修工作量相当于人修42个工日, 每 $1\text{hm}^2$ 人修埂坎用工约150~225个工日, 机修比人修节约

费用21.3%。我国黄土高原面积广袤, 现有耕地面积 $1.30 \times 10^7\text{hm}^2$ 多, 需要进行坡改梯的面积超过了 $2.67 \times 10^6\text{hm}^2$ , 推广机修梯田优化技术, 可以产生巨大的经济效益。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 牟朝相. 水平梯田工程设计[S]. 甘肃省水利厅水土保持局, 1992. 43—53.
- [2] 周孚明. 山地梯田埂坎设计探讨[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 281—282.
- [3] 牟朝相. 梯田田面高程设计的二元回归分析[J]. 中国水土保持, 1983. 44—48.