

# 基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化

梁改革<sup>1,2,3</sup>, 高建恩<sup>1,3,4</sup>, 韩浩<sup>3,4</sup>, 孟岩<sup>3,4</sup>, 幸定武<sup>4</sup>, 赵文君<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院研究生院, 100049 北京;  
3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 712100 陕西杨凌; 4. 西北农林科技大学, 712100 陕西杨凌)

**摘要** 针对黄土高原丘陵沟壑区坡地作物普遍存在的干旱缺水与水土流失问题, 基于作物需水过程和降雨径流调控理念, 利用 WEPP模型对不同梯田模式下春玉米生育期的降雨、径流、入渗、蒸发、土壤水进行作物生育期需水耗水过程计算。结果表明: 研究条件下, 单一模式隔坡梯田不能完全解决春玉米需水与天然来水在时间上的错位问题, 且一般情况下需要 1: 6~ 1: 8平坡比收集降雨径流, 土地资源浪费严重; 结合水窖, 不但能大量节约土地资源、满足作物需水, 且隔坡梯田作物年产量、作物水分利用效率和降水利用效率较无隔坡条件均增加 50% 以上, 基本实现作物增产和减少水土流失的双重目标; 得出的典型模式隔坡梯田平坡比取值参考表可供黄土丘陵沟壑区隔坡梯田设计规划参考。在黄土高原丘陵沟壑区, 隔坡梯田与水窖蓄水配合, 不但可满足作物生长过程需水, 而且又可防止水土流失, 是适宜推广的坡地降雨径流调控方式, 这对坡地水土资源高效利用具有实际指导意义。

**关键词** 作物需水; 降雨径流调控; WEPP; 隔坡梯田; 结构优化

## Optimization of structure of slope-separated terrace based on crop water requirement and control of rainfall runoff

Liang Gaige<sup>1,2,3</sup>, Gao Jian'en<sup>1,3,4</sup>, Han Hao<sup>3,4</sup>, Meng Yan<sup>3,4</sup>, Xing Dingwu<sup>4</sup>, Zhao Wenjun<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, 712100 Yangling Shaanxi 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences 100049 Beijing 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling 712100 Yangling Shaanxi 4. Northwest Agricultural and Forestry University, 712100, Yangling Shaanxi China)

**Abstract** In order to solve the problems of drought and water shortage and soil erosion for crops on hilly area of Loess Plateau, this paper calculated the precipitation, runoff, erosion and sediment yield, infiltration, evaporation and soil water for the process of water requirement during *Zea mays* L. growth period for different terrace modes using WEPP model, basing on crop water demand and control of rainfall runoff. The results showed that the individual slope-separated terrace could not fully solve the dislocation problem in time between the *Zea mays* L. water requirement and natural runoff, and ordinarily the ratio of terrace width to interval slope length should be 1: 6 to 1: 8 to collect the rainfall runoff, which seriously wasted the land resources. Combining the water cellar, not only a large number of land resources could be saved to meet the water requirement, but also the annual crop yield, water use efficiency and precipitation use efficiency on slope-separated terrace were higher by more than 50% than that on level terrace, which basically achieved the dual goals of increasing crop yield and reducing soil erosion. The

收稿日期: 2010-03-29 修回日期: 2010-11-15

项目名称: 国家科技支撑计划项目“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成与示范”(2011BAD31B05); 水体污染控制与治理科技重大专项“保障渭河生态基流的关中地区农业节水及调控技术研究”(2009ZX07212-002-003-02); 国家自然科学基金项目“黄土高原小流域坡沟侵蚀系统水沙关系模拟试验研究”(50809056)

第一作者简介: 梁改革(1984—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 水土资源高效利用。E-mail: geziliang@126.com

- 责任作者简介: 高建恩(1962—), 男, 研究员, 博士, 博士生导师。主要研究方向: 地表径流调控与利用。E-mail: gaojianen@126.com

given table of the ratio of terrace width to interval slope length on typical model could provide a reference for the design and planning of the slope-separated terrace on hilly area of Loess Plateau. This study showed that the combination of slope-separated terrace and water cellar was a pattern of control of rainfall runoff on slope suitable for promotion, for the reason that it could not only meet crop water demand during the whole growth period, but also could prevent water loss and soil erosion, and it had an actual meaning in guiding efficient utilization of land and water resources on slope land.

**Key words** crop water requirement; control of rainfall runoff; WEPP; slope-separated terrace; optimization of structure

干旱缺水与水土流失是黄土高原地区生态环境建设面临的主要问题之一, 降雨径流调控是同步解决这一对矛盾的重要方式<sup>[1]</sup>。隔坡梯田作为一种传统的梯田形式, 其叠加利用雨水资源的自然优势能够将抗旱与水土保持很好地结合, 是同步解决干旱缺水与水土流失矛盾的一种行之有效的降雨径流调控措施<sup>[2-3]</sup>。在黄土高原大部分地区, 受干旱缺水、降水在年内分布不均且与作物需水关键期不同步等条件限制以及大量降水资源无效蒸发影响, 加之实际工程中有关隔坡梯田设计方法不够明确和修筑过程中梯田结构形式布置较为随意等现实问题, 实际建设的隔坡梯田水分利用率不高, 梯田效益并不能得到充分发挥, 因而也不能很好解决梯田作物的干旱缺水问题<sup>[4-6]</sup>。目前, 国内一些学者<sup>[7-10]</sup>已相继从试验研究、理论分析计算和集水技术原理等角度对隔坡梯田径流调控利用方式开展了一定程度的工作, 但基于作物生理需水过程和调控降雨径流高效利用水土资源的模型优化梯田结构研究较少。隔坡梯田综合效益的发挥在一定程度上主要取决于隔坡段径流利用效率和水平段作物需水要求的满足程度<sup>[11]</sup>。鉴于此, 笔者从梯田作物需水要求和降雨径流调控角度出发, 结合考虑降雨径流调控相关物理过程较详细的 WEPP 模型对典型模式隔坡梯田结构进行优化计算, 以期对黄土高原较普遍的土地利用方式——梯田的结构优化提供技术支撑。

## 1 基于作物需水和降雨径流调控的优化原理与方法

黄土高原坡地作物普遍面临季节性干旱缺水与水土流失问题<sup>[1]</sup>, 隔坡梯田能够较好地汇集降雨径流补充水平梯田作物需水, 在提高农田抗旱能力方面具有很大优势<sup>[3]</sup>。

### 1.1 优化原理

土壤水分条件适宜与否直接关系到作物的生长发育和产量构成<sup>[12]</sup>。作物水分亏缺状况可用作物

生育期内土壤水分指标——土壤储水量来反映: 当土壤储水量介于土壤允许最大与允许最小储水量之间时, 作物能够保持正常生长; 当土壤储水量开始低于土壤允许最小储水量, 则需采取灌溉措施, 以便及时改善农田土壤水分状况, 维持作物正常生长<sup>[13]</sup>。土壤水分条件受降雨、径流、入渗、蒸发等水文过程直接影响, 基于作物需水和降雨径流调控理念优化隔坡梯田结构的主要目的就是结合作物生育期降雨、径流、蒸发以及土壤水的过程计算, 通过合理调控降雨径流同步解决作物水分亏缺与水土流失问题。

### 1.2 优化方法

基于验证的 WEPP 模型进行降雨、径流、侵蚀产沙、入渗、蒸发以及土壤水的过程计算, 并以作物需水要求作为控制指标, 确定最优平坡比取值。主要包括: 1) 通过 WEPP 模型的灌溉模块间接反映隔坡径流对水平梯田土壤水分的贡献; 2) 结合 WEPP 模型水文过程模块关于土壤水分的日变化过程模拟结果, 确定满足作物需水要求的最优平坡比取值; 3) 结合 WEPP 模型关于作物产量的模拟结果分析平坡比优化结果的合理性; 4) 结合平坡比优化结果进一步分析隔坡梯田防止水土流失的效果。

## 2 WEPP 模型的准备

### 2.1 研究区概况

安塞位于黄土高原腹地, 地处 E 109°19', N 36°51', 属暖温带半干旱气候类型区。年平均温度 8.8℃, 极端高温 36.8℃, 极端低温 -23.6℃, 多年平均降水量 510 mm, 年蒸发量 1 100 mm, 地貌类型为典型的梁峁状丘陵沟壑区, 沟壑密度为 8.06 km/km<sup>2</sup>, 主要土壤类型为黄绵土, 受自然条件和人类活动共同影响, 水土流失较为严重, 未治理区域侵蚀模数达 1.4 万 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[14]</sup>。

该区粮食作物以春玉米 (*Zea mays* L.)、谷子 (*Setaria italica*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 和糜

子 (*Panicum miliacenum* L.) 等为主, 经济作物以苹果 (*Malus*) 和红枣 (*Ziziphus jujuba* Mill) 等优质高产经济林果为主<sup>[14]</sup>。降水量年际差异较大, 且在年内分布极不均匀, 7—9月的降水之和超过全年降水量的 70%, 但多为随机性暴雨, 水的供需矛盾在作物需水关键期表现尤为尖锐。干旱缺水与水土流失共存的矛盾是该区农业生产发展的重要限制性因素<sup>[11]</sup>。

### 2.2 WEPP模型的验证

WEPP模型是迄今为止考虑降雨径流侵蚀调控相关物理过程较详细的分布式数学模型, 它包含天气随机生成、灌溉、水文过程、植物生长、地表径流和侵蚀过程等 9 个过程模块以及气候、土壤、地形和管理措施 4 个数据库参数模块<sup>[15-18]</sup>。该模型较全面地考虑了降雨径流侵蚀调控的一些主要方面, 其中关于降雨、径流、侵蚀、灌溉和地表水文过程的模拟计算能够为隔坡梯田结构优化提供基本参数。

在前人研究<sup>[19,20]</sup>的基础上, 率定得到休闲地有

效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性参数分别为 19.7 mm/h、3.5 Pa 和 0.026 s/m, 苜蓿 (*Medicago sativa* Linn) 地分别为 22.7 mm/h、5.1 Pa 和 0.019 s/m, 其他土壤参数采用 WEPP 默认值, 据此建立土壤数据库文件; 气象、地形和作物管理数据库文件根据实际情况建立。采用安塞水土保持科学试验站 1991—1992 年 15 场次降雨产流观测资料以及土壤水连续观测资料, 利用 WEPP 模型模拟计算次降雨条件下的产流、产沙量和土壤水日连续变化过程, 并用相关分析的方法对模拟结果进行检验, 如图 1~2 所示。可以看出: 采用以上土壤参数的 WEPP 模型对产流的计算优于对产沙的计算; 产流量预测值与实测值基本吻合; 产沙量预测值在一些情况下略高于实测值, 但用于梯田参数的计算更安全; 土壤储水量的模拟计算结果与实测值基本吻合。因此, 采用以上土壤参数的 WEPP 模型对产流、产沙和土壤储水量的模拟计算结果基本合理, 可作为研究区不同水文过程的预测工具。

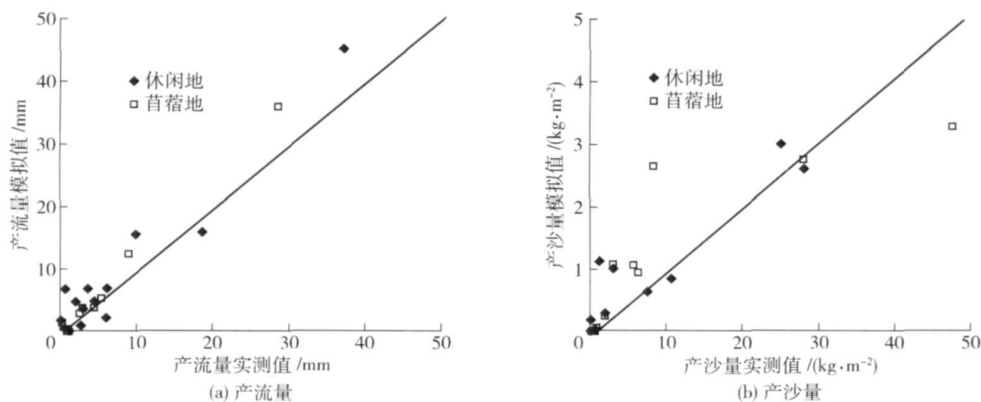


图 1 休闲地和苜蓿地产流量及产沙量模拟结果

Fig 1 Simulated result of runoff yield and sediment yield on *Medicago sativa* Linn and fallow field

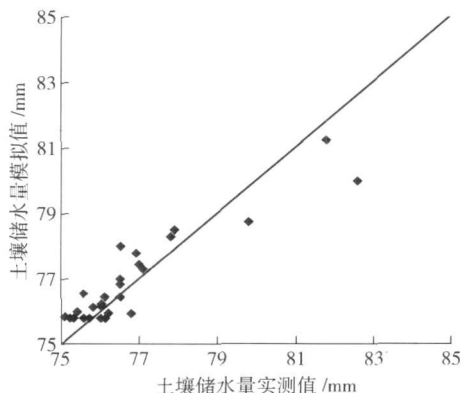


图 2 春玉米地土壤储水量模拟结果

Fig 2 Simulated result of soil water storage for *Zea mays* L. field

### 2.3 优化设计典型条件的选择

2.3.1 气象条件 已有安塞地区 20 年序列气象资料统计结果<sup>[11]</sup>表明, 该地区 50% 保证率的年降雨量为 506mm, 因此, 选取年降雨量为 510mm 且具有丰富实测资料的 1989 年作为本研究典型平水年代表年份。利用“当量降雨过程”概念<sup>[21]</sup>对该平水年 4—9 月产流型降雨过程进行概化, 概化的月当量降雨过程参数见表 1。

2.3.2 隔坡梯田模式 水平梯田种植春玉米, 隔坡段土地利用方式为 2 年生苜蓿和休闲地, 其中, 2 年生苜蓿地每年 6 9 月初各收割 1 次, 覆盖度控制在 65% 左右, 最大高度控制在 30 cm 左右; 休闲地每年

表 1 平水年 4—9 月份月当量降雨过程参数

Tab 1 Parameters of monthly equivalent rainfall from April to September in normal rainfall year

月份	降雨量 mm	降雨强度 (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨历时 h
4	10.4	19.1	0.54
5	7.0	28.8	0.24
6	9.2	56.8	0.16
7	130.5	10.3	12.70
8	32.0	56.8	0.56
9	62.1	28.8	2.16

4月中旬进行翻地, 翻耕深度 20 cm, 小区杂草覆盖

表 2 春玉米不同生育阶段适宜土壤储水量范围参考

Tab 2 Reference of suitable range of soil water storage for different growth stage of *Zea mays* L.

生育阶段	日期	根系深度范围	计划湿润层深度	平均湿润层	土壤允许储水量 /mm		灌水定额
		cm	cm	cm	最大	最小	mm
幼苗期	05-05—06-20	0~40	40	40	111.4	61.3	50
拔节期	06-21—07-20	0~40	40	40	111.4	61.3	50
抽穗期	07-21—08-10	0~60	30~60	45	125.1	68.8	56
灌浆期	08-11—09-10	0~80	50~80	65	183.0	100.7	82
成熟期	09-11—09-20	0~80	60~80	70	197.2	108.5	89

### 3.2 无隔坡条件下春玉米全生育期土壤水分状况分析

无隔坡条件下春玉米全生育期根层土壤日储水量、日蒸发蒸腾量变化过程如图 3 和图 4 所示, 表明: 受概化的典型平水年气象条件影响, 5—7 月间

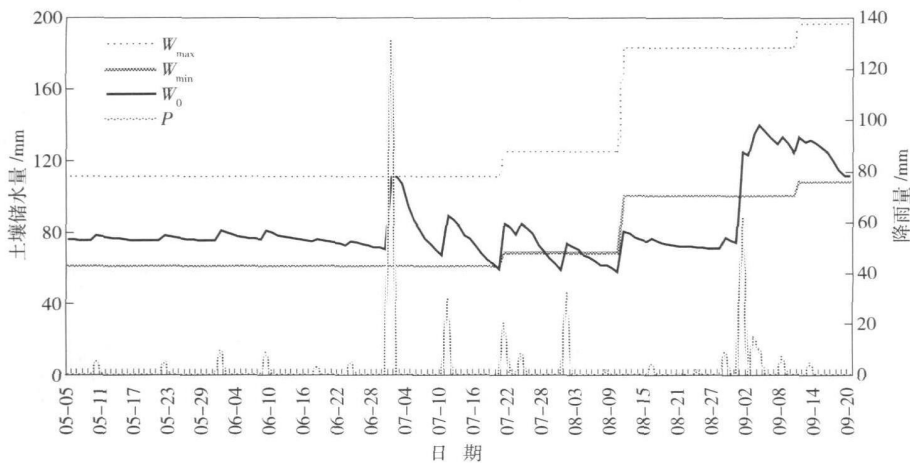
度小于 3%; 土壤密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量 22.3%。

### 3 基于 WEPP 模型的平坡比优化过程

#### 3.1 春玉米不同生育阶段适宜土壤储水量标准的确定

依据安塞黄绵土土壤基本性质<sup>[22]</sup>和春玉米不同生育阶段计划湿润层深度参数值<sup>[13]</sup>, 结合土壤允许最大、最小储水量计算方法<sup>[13]</sup>得到研究区春玉米不同生育阶段适宜土壤储水量范围及灌水定额参考值, 见表 2 将其分别作为春玉米全生育期土壤水分亏缺的判别标准。

的日蒸发蒸腾量变化不稳定并在 7 月初发生明显跳跃。春玉米生育期内主要需水阶段——抽雄期和灌浆期出现了较为严重的土壤水分亏缺现象, 同期蒸发蒸腾量相对较大、降雨量相对较少, 其对农田土壤水分的补充相对有限; 而作物非需水关键期的 7 月



$W_{max}$  为土壤允许最大储水量变化过程;  $W_{min}$  为土壤允许最小储水量变化过程;  $W_0$  为无隔坡梯田条件下水平梯田春玉米土壤日储水量变化过程, 下同。

图 3 春玉米全生育期土壤日储水量变化过程

Fig 3 Daily changing process of soil water storage during the whole growth period of *Zea mays* L.

初和 9 月初降雨资源却较为丰富。这种情况表明, 针对作物需水规律与天然来水在时间上的错位问

题, 需要采取有效措施对天然来水进行合理调控, 从而保证作物正常生长并实现优质、高产目标。

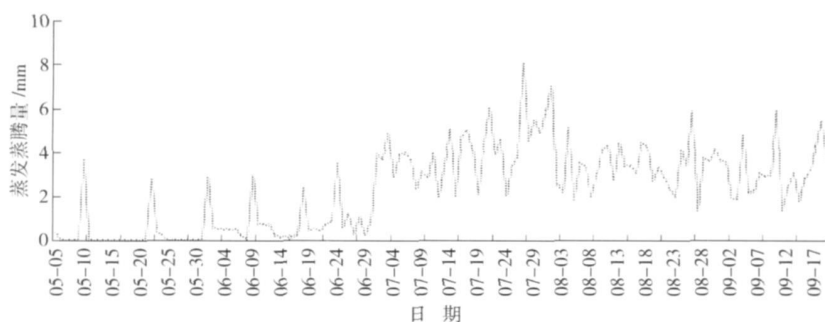


图 4 春玉米全生育期日蒸发蒸腾量变化过程

Fig 4 Daily changing process of evapotranspiration during the whole growth period of *Zea mays* L

### 3.3 隔坡梯田平坡比优化过程

隔坡梯田坡段径流对水平段土壤水分的贡献包括 2 种途径: 直接蓄存于土壤水库自动调节和改善土壤水分状况; 间接蓄存于水窖人为调节和改善土壤水分状况。以下为隔坡段种植苜蓿、坡度为  $10^\circ$  的平坡比优化过程。

3.3.1 不结合水窖情形 在不结合水窖条件下, 隔坡段径流对水平段土壤水分的贡献与以隔段径流量为灌水量的灌溉措施贡献相当。其中灌水量相当于隔坡径流深转换得到的水平段实际水深, 灌水时间相当于隔坡径流的实际发生时间。

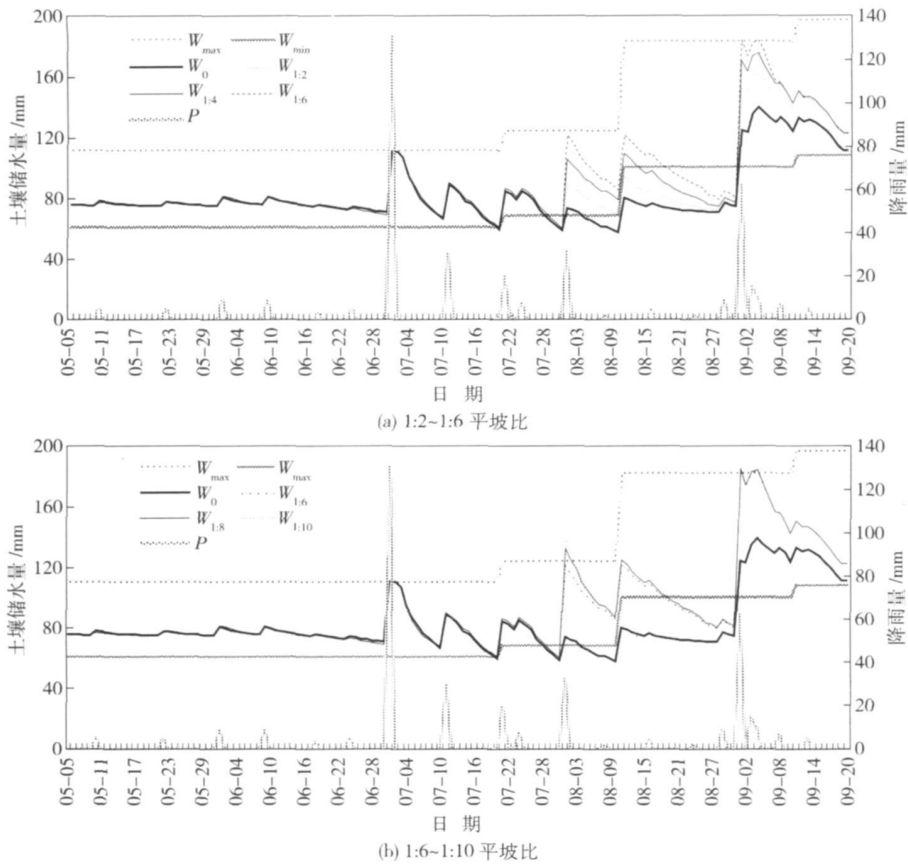
1: 2~ 1: 10 平坡比隔坡梯田春玉米全生育期土壤日储水量变化过程见图 5 表明: 有隔坡汇流的土壤储水量与无隔坡汇流相比均有不同程度增加, 但作物生育期内仍存在储水量低于允许最小储水量时段; 平坡比取值为 1: 2~ 1: 6 时, 低于允许最小储水量时段较无隔坡汇流情况均明显缩短; 当平坡比超过 1: 6, 土壤储水量变化趋向稳定, 1: 6~ 1: 10 平坡比条件的储水量变化曲线基本重合。因此, 能够最大程度满足作物需水要求的平坡比应在 1: 6~ 1: 8 之间选择。在本研究条件下, 当隔坡段较长时, 其自身调节作用较大, 但汇流功能存在极值, 单独隔坡梯田不能解决作物全生育期水分需求与天然水分供给在时间上的错位问题, 且一般情况下需要较长的隔坡段收集降雨径流, 对土地资源浪费严重。

3.3.2 结合水窖情形 单独隔坡梯田需要隔坡段过长, 不仅浪费土地资源, 而且自身调节作用使得过长隔坡段并不一定能有效解决作物的缺水问题, 水平段作物水分亏缺主要由 7—8 月强蒸发作用引起; 因此, 有必要结合蓄水工程 (如水窖) 对隔坡径流加以调节。计算原理为: 1) 根据无隔坡梯田条件下土

壤储水量情况确定第 1 次灌水时间、灌水定额以及适宜于收集径流的典型次降雨, 并初步假定适宜平坡比取值; 2) 利用 WEPP 模型模拟该平坡比条件下土壤储水量变化情况, 确定该平坡比条件下的第 1 次灌水时间; 3) 运行模型模拟该平坡比条件下经过一次灌水的土壤储水量变化情况, 当全生育期需水要求不能满足时确定下一次灌水时间和灌水定额, 并重新假定平坡比取值, 然后循环步骤 2) 和 3), 直至所选平坡比能够使得作物全生育期土壤储水量均能满足要求。其中灌水时间为土壤储水量开始出现低于土壤允许最小储水量日期, 灌水量为灌水定额。

按照上述方法的优化计算过程及结果如图 6 所示。由图 6(a) 可知: 平坡比取值为 1: 2.5 结合坡面排水工程将 7 月初当量降雨径流收集存储于水窖, 其他时间的隔坡段径流自然汇入水平梯田, 土壤储水量于 7 月 20 日开始低于允许最小储水量; 如果在 7 月 20 日利用水窖收集的前期降雨径流量 (50mm) 进行灌溉, 其他时间的隔坡段径流自然汇入水平梯田土壤水库, 土壤储水量于 8 月 17 日再次开始低于允许最小储水量。因此, 1: 2.5 平坡比条件并不能保证作物全生育期需水要求的满足, 需要增大平坡比。

由图 6(b) 可知: 平坡比取值为 1: 4.5 时, 结合坡面排水工程将 7 月初当量降雨径流收集存储于水窖, 其他时间的隔坡段径流自然汇入水平梯田土壤水库, 土壤储水量于 7 月 20 日开始低于允许最小储水量; 如果在 7 月 20 日将水窖收集的前期降雨径流进行灌溉, 同时利用水窖收集 8 月初当量降雨径流, 其他时间的隔坡段径流自然汇入水平梯田土壤水库, 土壤储水量于 8 月 12 日再次开始低于允许最小



$W_{1.2} \sim W_{1.10}$  分别为平坡比取值为 1:2 ~ 1:10 的春玉米土壤日储水量变化过程。

图 5 1:2~1:10 平坡比隔坡梯田春玉米全生育期土壤储水量对比

Fig 5 Comparison of soil water storage during the whole growth period of *Zea mays* L. under the ratio of terraced width to interval slope length from 1:2 to 1:10

储水量; 如果利用收集的 7 月初降雨径流与 8 月初降雨径流分别于 7 月 20 日和 8 月 12 日进行灌溉, 其他时间的隔坡段径流自然汇入水平梯田土壤水库, 土壤储水量在整个生育期内均能维持在允许最大储水量与允许最小储水量范围之内。因此, 能够保证作物全生育期需水要求满足的适宜平坡比取值为 1:4.5。

由此可见, 将隔坡梯田和水窖工程相结合, 能够发挥水窖蓄水和防止降雨径流过度蒸发的功能, 通过对降雨径流在时空上的合理再分配, 在一定程度上解决作物水分需求与天然水分供给在时间上的错位问题, 并实现“适时”补充作物亏缺水的功效。

### 4 优化结果与分析

#### 4.1 平坡比优化结果及分析

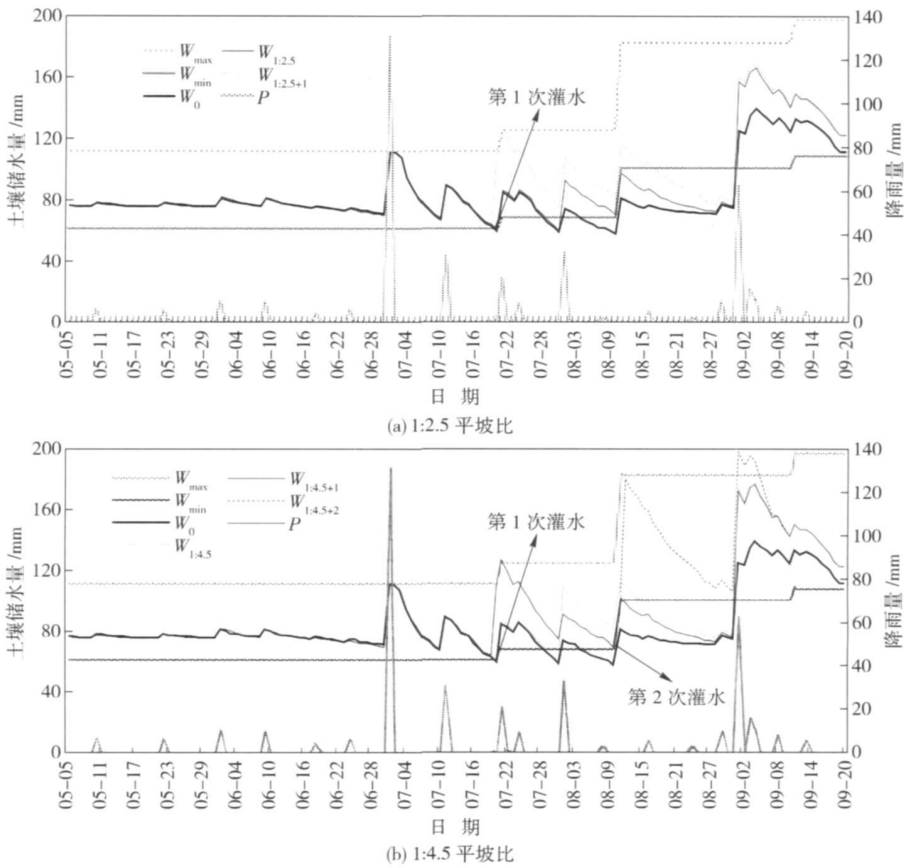
遵循以上平坡比优化方法, 对隔坡段土地利用方式为 2 年生苜蓿和休闲地 2 种情况分别进行计算, 得到最优平坡比及相应水窖容积取值, 见表 3。

可知: 坡度小于  $10^\circ$  以及单独利用的隔坡梯田平坡比取值均较大; 坡度大于  $10^\circ$  时, 隔坡段为休闲地且结合水窖情形的平坡比取值较其他情形最小。从提高水土资源利用效率出发, 隔坡梯田更适合修建于  $10^\circ$  以上坡地, 并建议与水窖工程结合推广应用; 当隔坡段产流效率较高时, 能够在满足梯田作物需水要求的同时保证较高的土地资源利用效率, 建议实际中结合人工集流面技术收集隔坡段径流<sup>[11]</sup>, 在尽量减小平坡比的前提下同步实现水土资源高效利用。

根据表 3 优化结果, 对平坡比倒数、水窖容积与坡度分别进行相关分析, 发现二者与坡度均呈显著幂函数关系 (相关系数均大于 0.97), 见表 4。该结果对黄土高原丘陵沟壑区隔坡梯田设计规划具有一定参考价值。

#### 4.2 产量效益分析

以隔坡段种植苜蓿、坡度为  $10^\circ$  的优化结果为例, 分析不同情形的春玉米产量效益, 见表 5。表明: 与无隔坡条件相比, 结合水窖隔坡梯田春玉米年



$W_{1:2.5}$ 为平坡比为 1:2.5 7月初径流收集的土壤储水量日变化过程;  $W_{1:2.5+1}$ 为平坡比为 1:2.5 7月 20日灌水 50mm 情形的土壤储水量日变化过程;  $W_{1:4.5}$ 为平坡比为 1:4.5 7月初径流收集情形的土壤储水量日变化过程;  $W_{1:4.5+1}$ 为平坡比为 1:4.5 7月 20日灌水 50mm, 8月初径流收集情形的土壤储水量日变化过程;  $W_{1:4.5+2}$ 为平坡比为 1:4.5 7月 20日灌水 50mm, 8月 12日灌水 82mm 情形的土壤储水量日变化过程。

图 6 平坡比试算过程

Fig 6 Trial calculation process about ratio of terrace width to interval slope length

表 3 隔坡梯田平坡比优化结果

Tab 3 Optimal results about ratio of terrace width to interval slope length of slope-separated terrace

坡度 (°)	水平梯田宽度 m	隔坡段为苜蓿			隔坡段为休闲地		
		不结合水窖	结合水窖		不结合水窖	结合水窖	
		平坡比	平坡比	水窖容积 /m <sup>3</sup>	平坡比	平坡比	水窖容积 /m <sup>3</sup>
5	30	> 1:11	1:6.5	3.15	> 1:7	1:2.0	3.03
10	20	1:7~1:8	1:4.5	1.82	1:4~1:5	1:2.0	1.92
15	15	1:6~1:7	1:4.0	1.31	1:3~1:4	1:1.5	1.42
20	10	1:5~1:6	1:3.5	0.85	1:2~1:3	1:1.5	0.93
25	8	1:5~1:6	1:3.5	0.67	1:2~1:3	1:1.5	0.74

注: 水窖容积指单位宽度梯田所对应水窖容积。

产量、作物水分利用效率以及降水利用效率较无隔坡条件均增加 50% 以上; 未结合水窖、平坡比取值最优隔坡梯田的增加幅度略偏小; 单独隔坡梯田条

件下, 当平坡比取值小于 1:7 时, 不同平坡比条件的产量、水分利用效率和降水利用效率增加率差异较为明显。由此可见, 作物高产目标的实现对土壤水

表 4 平坡比倒数及水窖容积与坡度相关关系分析

Tab 4 Relationship between the reciprocal of ratio of terrace width to interval slope length or volume of water cellar and slope

类别	隔坡段利用方式	拟合关系式	R <sup>2</sup>
平坡比倒数与坡度关系	苜蓿	$y = 12.67x^{-0.440}$	0.971
	休闲地	$y = 2.343x^{-0.159}$	0.980
水窖容积与坡度关系	苜蓿	$y = 15.56x^{-0.955}$	0.984
	休闲地	$y = 13.245x^{-0.871}$	0.973

分要求较高, 结合水窖隔坡梯田具备提高水土资源利用率和增加作物产量的双重优势。

### 4.3 蓄水埂拦沙效果分析

对结合水窖的隔坡梯田蓄水埂拦沙效果进行分析, 见表 6。表明以上平坡比隔坡梯田, 其水平段在设计年限内的累积淤积深度大都小于 30 cm (隔坡段为 25°休闲地情况除外)。考虑到本研究气象条件是基于当量降雨过程建立的, 当隔坡梯田蓄水埂高按照梯田设计规范——30 cm 修建时, 基本能够实现有效拦沙和防止水土流失的问题。

表 5 不同情形的春玉米产量效益分析

Tab 5 Yield profit analysis of *Zea mays* L. under different conditions

类别	产量 / (kg m <sup>-2</sup> )	产量增加率 %	作物水分利用效率增加率 %	降水利用效率增加率 %	
无隔坡梯田	0.363	0	0	0	
隔坡梯田 + 水窖	隔坡段为苜蓿	0.555	52.9	49.9	52.9
	隔坡段为休闲地	0.561	54.5	51.8	54.5
隔坡梯田	I: 1	0.406	11.8	10.6	11.9
	I: 2	0.442	21.8	19.4	21.8
	I: 3	0.474	30.6	28.0	30.6
	I: 4	0.503	38.6	35.8	38.6
	I: 5	0.530	46.0	43.1	46.0
	I: 6	0.548	51.0	47.9	51.0
	I: 7	0.551	51.8	48.7	51.8
	I: 8	0.551	51.8	48.7	51.8

表 6 最优平坡比隔坡梯田蓄水埂拦沙效果分析

Tab 6 Sediment retaining effect analysis of in poundment bank of slope-separated terrace under optimal structure

坡度 (°)	设计年限 a	隔坡段为苜蓿			隔坡段为休闲地		
		最优 平坡比	年沉积量 kg m <sup>-2</sup>	10 a 累积淤积深度 cm	最优 平坡比	年沉积量 kg m <sup>-2</sup>	10 a 累积淤积深度 cm
5	10	I: 6.5	5.01	4	I: 2.0	18.99	15
10	10	I: 4.5	8.02	6	I: 2.0	25.62	20
15	10	I: 4.0	10.05	8	I: 1.5	28.48	22
20	10	I: 3.5	11.06	9	I: 1.5	36.43	28
25	10	I: 3.5	13.05	10	I: 1.5	45.86	35

## 5 结论

1) 由于黄土高原丘陵沟壑区蒸发量大, 单独的隔坡梯田不能实现“适时”补充作物亏缺水的功能, 因而不能解决作物水分需求与天然水分供给在时间上的错位问题, 且一般情况下需要较大的平坡比收集隔坡径流, 对土地资源浪费较严重。

2) 利用水窖的蓄水防蒸发功能, 采用“水窖 +

隔坡梯田”模式, 不仅能够对隔坡梯田降雨径流资源在时空上进行合理再分配, 在一定程度上解决作物水分需求与天然水分供给在时间上的错位问题, 而且能够实现“适时”补充作物亏缺水的功效; 梯田春玉米年产量以及水分利用效率、降水利用效率均增加 50% 以上, 且能够有效防止水土流失。该模式具备提高水土资源利用效率、增加作物产量和防止水土流失的优势, 是适宜推广的坡地降雨径流调控



方式。

3) 隔坡梯田宜修建于  $10^\circ$  以上坡地, 且当隔坡段产流效率较高时, 能够在满足梯田作物需水要求的同时保证较高的土地资源利用效率, 建议实际中结合人工集流面技术收集隔坡段径流, 在尽量减小平坡比的前提下同步实现水、土资源高效利用; 本文给出的梯田最优平坡比及相应水窖容积取值参考表可供隔坡梯田实际应用参考。

4) 利用 WEPP 模型进行降雨、径流、侵蚀、蒸发以及土壤水的过程计算, 并以作物需水要求作为控制指标确定隔坡梯田最优结构形式, 方法较为合理; 但仍需对隔坡段采取不同调控措施以及不同水文年情况做进一步深入研究。

## 6 参考文献

- [1] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 13-17
- [2] 焦菊英, 王万忠. 黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 59-63
- [3] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 331-333
- [4] 杨光琦. 隔坡梯田的试验研究 [J]. 中国水土保持, 1984(6): 12-15
- [5] 尹传逊, 常根富. 隔坡梯田效益研究 [J]. 中国水土保持, 1984(6): 16-18
- [6] 戴武刚, 霍进忱, 邹桂霞. 辽西低山丘陵区集流聚肥梯田土壤水分动态变化规律研究 [J]. 水利发展研究, 2002, 2(8): 31-32
- [7] 裴金萍, 张宽地, 王志刚. 隔坡集流梯田工程的研究与规划 [J]. 中国农村水利水电, 2004, 11(2): 16-17
- [8] 高晓玲, 蒋定生. 隔坡梯田优化设计试验研究 [J]. 水土保持研究, 1994, 1(1): 89-98
- [9] 肖永全, 叶殿秀. 黄土高原隔坡水平梯田的标准问题探讨 [J]. 陕西气象, 1999(3): 19-22
- [10] 裴金萍, 沙际德. 不同流失区隔坡梯田间距的确定 [J]. 中国水土保持, 1995(3): 19-21
- [11] 吴普特, 黄占斌, 高建恩. 人工汇集雨水利用技术研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 159-161
- [12] 陕西省水利水土保持厅. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 75-80
- [13] 王庆河. 农田水利 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 54-59
- [14] 中国科学院水利部西北水土保持研究所. 黄土丘陵区水土保持型生态农业研究 [M]. 陕西杨凌: 天则出版社, 1990: 36-56
- [15] 张玉斌, 郑粉莉, 贾媛媛, 等. WEPP 模型概述 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 146-149
- [16] National Soil Erosion Research Laboratory(US). WEPP predicting water erosion using a process based model [J]. Journal of Soil and water Conservation, 1997, 52(2): 96-102
- [17] Elliot W J A and C D. Validation of the weather generator CLIGEN with precipitation data from UGANDA [J]. Trans ASAE, 2001, 44(1): 53-58
- [18] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(4): 127-142
- [19] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 50-55
- [20] 幸定武, 高建恩. WEPP 在黄土高原坡面径流调控中的适用性研究 [J]. 人民黄河, 2008, 30(4): 66-68
- [21] 高建恩, 吴普特, 牛文全, 等. 黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 41-45
- [22] 陕西省农业勘察设计院. 陕西农业土壤 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1980: 71-72

(责任编辑: 程云)