

旱地农田微集水种植的水分生产潜力增进机理研究

樊廷录

(甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过数学公式推导和土壤水分有关物理参数, 研究了全生育期、夏休闲期覆膜微集水两种方式对水分生产潜力的增进机理, 并就这两种形式对农田降水资源开发利用程度进行了总结与讨论。
关键词: 旱地农田; 微集水; 水分潜力; 机理
中图分类号: S 152.7 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2003) 01-0098-03

Study on Mechanism of Developing Water Potential in Inner Field Rainwater Harvesting of Dryland

FAN Ting-lu

(Dryland Agricultural Institute, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In ways of deduced by mathematics formulation and soil water physical parameter, mechanism of water potential development by inner field rainwater harvesting in full growing season and summer fallow period were studied. And in these two ways, degree of rainfall development potential in farmland were discussed and concluded.
Key words: dryland; rain water harvesting of inner field; mechanism; water potential

对于无灌溉条件的旱平地, 通过构筑沟垄, 实施垄膜沟种, 使垄面膜上自然降雨向沟内富集, 改善作物根区土壤水分环境, 是提高农田降水资源化程度和水分满足率的有效途径。微集水区构建是实施农田降水就地时空富集的关键。通过实施微集水技术, 将显著提高降水资源化程度, 增加作物的水分满足率, 从而增进水分生产开发。本文从作物全生育期和夏休闲期覆膜微集水两个方面, 研究该项技术的水分潜力增进机理。

1 作物全生育期起垄覆膜微集水的水分生产潜力增进机理

1.1 起垄覆膜技术对作物水分满足率的影响

旱作农田起垄覆膜微集水的形式如图 1 所示。 D 为设计垄宽(微集水区), F 为设计沟宽(水分入渗区或作物种植带), H 为设计垄高。

当采用微垄覆膜技术后, 直接落在沟内的雨量为 FR , 落在垄上并以径流形式汇聚到沟内的雨量为 $DR\beta$, 则作物生长季节单位面积上实际获得的水分为:

$$W = \frac{FR + DR\beta}{F + D} = \frac{(F + D\beta)R}{F + D}$$

式中: β ——垄面径流系数, R ——降雨量。

设旱平地未覆膜种植时作物需水量 ET_m 。垄上覆膜, 可堵绝蒸发损失, 仅沟内存在蒸发和蒸腾损耗。设作物需水量与蒸散面积成正比^[1], 采用起垄覆膜技术后作物需水量 ET

m 为:

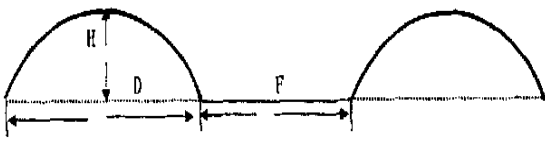


图 1 沟垄微集水种植示意图

$$ET_m = \frac{F}{F + D} ET_m$$

假设覆膜在作物播种前进行, 则旱平地未覆膜和起垄覆膜种植时作物水分满足率、可用下式表示:

$$x = \frac{R}{ET_m} \quad x = \frac{W}{ET_m} = \frac{(F + D\beta)R}{F ET_m}$$

则作物水分满足率的相对增量为:

$$\frac{x - x}{x} = \frac{(F + D\beta)R}{F R} - 1 = \frac{D}{F} \beta = K \beta$$

K ——垄宽与沟宽之比。

这样起垄覆膜后的作物水分满足率可表示为的线性函数:

$$x = x(1 + K\beta) = x(1 + 0.85K)$$

所以, 起垄覆膜后作物水分满足率随着 垄沟比的增加而

* 收稿日期: 2002-11-25
基金项目: 国家科技攻关项目(2001BA508B18)。
作者简介: 樊廷录(1965-), 男, 甘肃临洮人, 研究员, 主要从事旱地耕作制度研究工作。

提高。当垄沟比为 0.5, 即农田由 1/3 的垄膜产流区和 2/3 的聚流种植区构成相间排列的微集水区时, 作物水分满足率可提高 42.5%。

1.2 起垄覆膜技术对作物水分利用效率的影响

研究表明, 在肥力不受限制时, 作物的水分利用效率随作物实际水分满足率的提高而提高, 在实际水分满足率较低的阶段, 水分利用效率随实际水分满足率提高的速度很快, 当实际水分满足率达到逐渐满足的阶段, 水分利用效率提高的速度大为减缓。采用起垄覆膜技术, 其目的就是通过农田空间的水分再分配, 使水分满足率提高到水分利用效率最大值, 以期获得增产效应。

设 Y_w —— 平作耕地的作物降水生产潜力

$$Y_w = f(w) \cdot Y_T;$$

Y_w —— 起垄覆膜农田的降水生产潜力, $Y_w = f(w) \cdot Y_T$; Y_T 、 Y_T —— 平作耕地、起垄覆膜农田的作物光温生产潜力。

则 Y_T 可表达为: $Y_T = \frac{F}{F+D} Y_T = \frac{Y_T}{1+K}$

对 $Y_w = f(w) \cdot Y_T$ 式取对数后微分得:

$$\frac{dY_w}{Y_w} = \frac{df(x)}{f(x)} + \frac{dY_T}{Y_T}$$

在作物临界水分满足率 α 和水分满足率为 1 之间, 作物水分供应订正系数与水分满足率的关系可近似地视为一直线关系^[2](图 2), 可简化处理, 设:

$$f(x) = \frac{x - \alpha}{1 - \alpha}$$

将 $f(x)$ 代入微分方程并取差分得:

$$\frac{\Delta Y_w}{Y_w} = \frac{x - \alpha}{x - \alpha} - \frac{D}{F + D} = k(\frac{x\beta}{x - \alpha} - \frac{1}{1 + k})$$

由于 $\alpha < x < 1$ 及 $0 < k < 1$ 和 $0 < \beta < 1$, 故有 $\Delta Y_w = Y_w - Y_w > 0$ 。

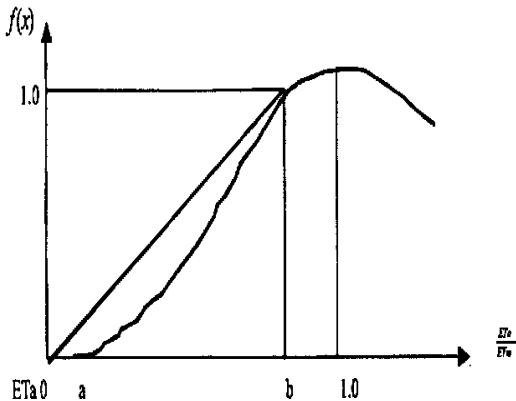


图 2 作物水分供应订正系数与作物水分满足率的关系

因此, 采用农田内微集水技术后, 只要膜垄产流效果好, 并且将水分满足率提高到 $(\alpha, 1)$ 的一个合适范围内, 作物降水生产潜力就会得到增进。X 愈接近临界水分满足率 α 值, 潜力增加愈明显; 干旱年份平作耕地当 x 值小于 α 的情况下, 实施起垄覆膜农业技术, 不致绝收。适当提高垄沟比或增加垄面径流系数, 可明显增进水分生产潜力。

1.3 起垄覆膜垄沟比的确定

由 $x = x(1 + K\beta)$ 推导出垄沟比为:

$$K = (\frac{x}{x} - 1) \frac{1}{\beta}$$

根据文献报道^[3], 取 0.8 左右, 虽不能将水分生产潜力增进至光温生产潜力, 但可以大幅度提高, 并且水分利用效率达到最大值附近。垄面径流系数取 0.85。一旦 x 接近或超过 1, 则潜在水分利用效率下降, 沟垄种植的增产作用大为减少。

2 农田夏闲期起垄覆膜微集水的水分生产潜力增进机理

对于旱平地, 除实施作物生育期内起垄覆膜微集水技术外, 也可在夏闲期用类似的起垄覆膜技术进行微集水, 但休闲期微集水的目的是最大限度增加土壤水分入渗能力, 减少雨季高强度的水分非目标性输出, 增加土壤深层贮水, 奠定持续提高农田生产力的水分基础。

2.1 夏闲期降雨最大限度就地富集入渗的沟垄比

旱平地夏闲期微垄覆膜的形式与图 1 类同, D 为设计垄宽(cm), F 为设计沟宽(cm), β 为垄面平均径流系数, R 为 12 h 的降雨量(mm), K 为垄沟比。当采用垄覆膜技术后, 在 F 宽度(入渗区)耕地上夏闲期直接降落在沟内的雨量为 FR , 降落在垄上以径流形式汇聚到沟内的雨量为 $DR\beta$, 则沟内单位面积实际获得的水分 W 为:

$$W = \frac{FR + DR\beta}{F} = (1 + \frac{D\beta}{F})R = (1 + K\beta)R$$

高原夏闲期多为降雨高峰期, 不同于生育期的起垄覆膜, 如果覆膜技术不当会引起农田径流发生。因此, 必须单独考虑入渗区的水分平衡问题。

在土壤物理学中, 描述土壤水分入渗的数学模型较多, 但最为普遍的是 A. H. Koetgkob 双曲线和 R. E. Horton 逆指数方程。根据大多数学者研究, 逆指数方程与黄土高原的实测资料有较好的吻合性, Horton 土壤水分入渗方程^[4]可表示为:

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-k_1 t}$$

式中: f_o —— 土壤初始入渗率 (mm/min); f_c —— 稳渗率, k_1 —— 衰减系数。

将 $f(t)$ 积分得降雨期间土壤累计入渗量为:

$$W(t) = f_c t + \frac{f_o - f_c}{k_1} (1 - e^{-k_1 t})$$

夏闲期起垄覆膜后, 沟内水分入渗区接受到更多降雨, 这时农田水分平衡方程为:

$$R_s(t) = W - W(t) = (1 + \frac{D\beta}{F})R - f_c t - \frac{f_o - f_c}{k_1} (1 - e^{-k_1 t})$$

只有当 $R_s(t) = 0$ 时, 即沟内富集的水分小于土壤入渗量时, 农田不发生径流, 降雨达到最大限度的就地入渗, 则垄沟比 (D/F) 可表示为:

$$\frac{D}{F} = \frac{f_c t}{R\beta} + \frac{f_o - f_c}{Rk_1\beta} (1 - e^{-k_1 t})$$

因此, 夏闲期塬面农田起垄覆膜降雨就地入渗且不发生径流的垄沟比上限值主要受降雨强度和土壤入渗参数的影响。

根据已有的参考文献, 垄面径流系数 $\beta = 0.9$, 最大入渗率 1.4 mm/min, 稳渗率 $f_c = 0.35$ mm/min, $k_1 = 0.0245$, R

= 50, 100, 150 mm/720 min 时, 则依据推导的垄沟比公式计算所得对应的 D/F 值是: 6.6 1, 3.3 1, 2.2 1, 即农田起垄覆膜覆盖面积依次为 86.8%、76.7%、68.8%。

考虑到沟内水分富集区以垂直入渗为主, 同时向膜内侧向扩散, 为了使膜内土壤不出现干土层, 田间地膜覆盖宽度以不超过 100 cm 为界, 假定 12 h 雨强为 50、100、150 mm, 则对应垄沟比上限值依次为 100 13.2、100 23.3、100 31.2; 若采用 80 cm 宽地膜, 田间实际覆膜宽度为 60 cm, 则对应降雨量下垄沟比上限值是 60 8、60 14、60 19。鉴于田间起垄覆膜的实际可操作性, 建议垄宽以 100 cm 和垄沟比小于或等于 4 1 为宜。

2.2 夏闲期起垄覆膜对作物水分满足率的影响

设旱平地作物水分满足率为:

$$x = \frac{\alpha R_1 + R_2}{ETm}$$

式中: x ——作物水分满足率; R_1 ——夏闲期降雨量(mm); α ——夏闲期蓄水量; R_2 ——作物生育期降雨量(mm)。又设: β_1 ——休闲期起垄覆膜后垄上的平均降水产流系数; α ——采用起垄覆膜技术后因减少蒸发面积而增大的休闲期蓄水效率。

采用起垄覆膜技术后, 在 $D + F$ 宽度耕地上, 整个休闲期内单位面积实际获得并保存的蓄水量 W_1 可表示为:

$$W_1 = \frac{FR_1 + D\beta_1R_1}{D + F}\alpha$$

由于垄上覆膜减少了实际蒸发面积, 因此 α 大于 α_0 。设旱平地夏闲期土壤失水率为 $1 - \alpha_0$ 起垄覆膜后, 因在 $F + D$ 宽度上只有 F 宽度蒸发失水, 故其失水率可表示为:

$$\frac{F}{F + D} (1 - \alpha)$$

则起垄覆膜后的蓄水量 α 应为:

$$\alpha = 1 - \frac{F}{F + D} (1 - \alpha) = \frac{D + \alpha F}{F + D}$$

W_1 因此可表示为:

$$W_1 = \frac{(D + \alpha F)(FR_1 + D\beta_1R_1)}{(F + D)^2}$$

如果考虑将作物播种在覆膜产流区, 则可认为生育期降雨量为生长季节实际得到的水分。因此, 全生产年度(夏闲期 + 生育期)覆膜微集水保墒后作物可得到水分:

$$W = \frac{(D + \alpha F)(FR_1 + D\beta_1R_1)}{(F + D)^2} + R_2$$

作物水分供应满足率 x 为:

$$x = \frac{W}{ETm} = \frac{(D + \alpha F)(FR_1 + D\beta_1R_1)}{(F + D)^2} + \frac{R_2}{ETm}$$

作物水分满足率的相对增量为:

参考文献:

[1] 陶士珩. 径流农业主要类型农田水分机理及生产力的研究[D]. 杨凌: 西北农业大学, 1998.
[2] 陶士珩, 王立祥, 杜世平. 起垄覆膜技术对降水生产潜力的增进机理研究[A]. 见李育中, 程延军: 抑蒸抗旱技术[M]. 北京: 气象出版社, 1996. 173– 179.
[3] 白清俊. 流域坡面综合产流数学模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 4(3): 56– 6.
[4] 李军, 等. 宁南半干旱偏旱区农田沟垄径流集蓄保墒效果与增产效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 89– 93.

$$\frac{x - x}{x} = \frac{(D + \alpha F)(FR_1 + D\beta_1R_1)}{(F + D)^2(\alpha R_1 + R_2)} + \frac{R_2}{\alpha R_1 + R_2} = \frac{(K + \alpha)(R_1 + K\beta_1R_1)}{(1 + K)^2(\alpha R_1 + R_2)} + \frac{R_2}{\alpha R_1 + R_2}$$

当 $\alpha = 0.35, \beta_1 = 0.9, R_1 = 280(\text{mm}), R_2 = 220(\text{mm})$ 时, 上式为:

$$\frac{x - x}{x} = \frac{(K + 0.35)(K + 1.11)}{1.32(1 + K)^2} + 0.69$$

因此, 夏闲期起垄覆膜降水就地富集与全生育期微集水种植结合, 作物水分满足率大幅度提高。

3 结论与讨论

综上所述, 黄土高原夏熟作物农田全生育期起垄覆膜微集水对水分生产潜力增进效益相当明显, 通过本文研究得出如下结论:

(1) 两种不同时期的微集水所开发利用的水分在数量上有着较大的差异。全生育期起垄覆膜微集水开发利用的对象是生育期内的散见性降雨, 是将农田的微效降雨资源化, 发挥小雨量的叠加增值效应, 谓之田内降水空间富集, 集水与用水基本上同时进行; 夏闲期起垄覆膜微集水开发利用的对象是降雨高峰期的集中性降雨, 旨在最大限度提高土壤水库的有效集贮量, 增加深层储水, 发挥土壤水库对作物生长后期的水分调节作用, 谓之田内降水时间富集, 集水与用水相对分开。

(2) 不同降水地区, 这两种技术的应用有一定差异。年降水量 400 mm 以下的半干旱或半干旱偏旱区, 作物产量就很低, 为了能有产量或不绝收, 可通过加大起垄覆膜宽度产生更多径流达到这一目的。但年降水量 400 mm 以上的半干旱或半湿润易旱区, 作物生产的降水保证率相对较高, 正常年份产量并不很低, 增加起垄覆膜宽度, 固然显著提高了产流量和种植区水分, 种植区作物生产力提高幅度大, 然而产流区面积的增加引起了种植区面积的相对减少, 结果因种植密度减少带来的产量降低超过了由水分富集带来的产量增加, 因而整体产量不高, 所以要科学构建微集水区结构, 即垄宽与沟宽的比例, 一般要求起垄覆膜产流宽度小于种植区宽度。

(3) 夏闲期起垄覆膜微集水, 注重产流、土壤水库集贮、保墒三者的结合, 微集水区构建的原则是保证不发生田外径流和田内长时间水层出现, 最大限度提高土壤深层储水, 同时要防止覆膜微集水区出现干土层, 播种时作物可直接在覆膜产流区上播种, 因而要求覆膜产流区宽度(种植区)大于水分入渗区宽度。

(4) 无论是那种微集水方式, 微集水的膜垄具有产流和较好控制农田土壤水分蒸发的双重作用, 在土壤贮水量增加的同时, 使无谓的物理蒸发化为有效的生物蒸腾, 有效抑制了农田水分的非目标性输出。