

PAM (聚丙烯酰胺) 应用于西北黄土地区旱作农业的经济分析

陆军¹, 黄兴法², 唐泽军², 詹卫华³

(1. 中国农业大学中国—以色列国际农业培训中心, 北京 100083; 2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 3 水利部综合事业局, 北京 100053)

摘要: 我国西北地区雨养(旱作)农业面积广大, 产量低而不稳。水是限制农作物产量的关键因素。地表使用 PAM 可以提高降雨入渗, 提高作物产量。该文从理论分析和试验数据出发, 研究用 PAM 进行旱作农业的经济性。分析了作物产量函数关系, 得到 PAM 降雨入渗增加和作物产量增加的关系。由试验数据, 得到了用 PAM 增加作物可用水量的定量关系。建立了定量计算不同降雨量、作物价格和 PAM 成本比条件下采用 PAM 提高作物生产经济效益的函数关系。用相关数据计算得到用 PAM 种植玉米的经济效益。结果表明种植玉米使用 PAM 可以产生很好的经济效益。说明在西北黄土地区用 PAM 进行旱作农业在经济上是可行的。

关键词: PAM; 黄土地区; 雨养农业; 经济性; 作物

中图分类号: S152.7; S513; F3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)02-0097-04

0 引言

西北地区包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆 5 省(区)及内蒙西部的阿拉善、伊克昭盟和乌海市。东西长 3150 km, 南北宽 2100 km, 总面积约 345 万 km²。

西北地区属于干旱和半干旱地区, 水资源缺乏, 生态环境脆弱。降雨(水)稀少, 大部分区域年降水量在 400 mm 以下, 其中 200 万 km² 面积的年降水量不足 200 mm。降雨量在年内分布也极不均匀。

由于气候干燥, 植被稀少, 暴雨集中, 土壤抗蚀性差, 水土流失严重, 每年向黄河输入大量的泥沙, 不断淤积的泥沙逐渐使黄河成为地上悬河; 另外, 大量泥沙增加了对黄河输沙水量的要求, 相应减少了黄河的有效水资源量。研究表明, 水土流失一方面造成千沟万壑, 支离破碎, 吞噬农田。另一方面使耕地表层的肥沃土壤流失, 大量的有机质和氮、磷、钾养分被流走, 降低土壤肥力, 耕层越来越薄, 直接危害土地的利用和农业的发展。西部地区大量的坡耕地由于水土流失, 导致土壤瘠薄, 产量低而不稳, 产量一般 750~1000 kg/hm²。严重的水土流失, 造成土地生产力退化, 严重制约了农业和农村经济的可持续发展。

西北地区特别是黄土高原地区, 降雨过程中土壤的表面会产生结皮。地表结皮会大大减少降水入渗, 增加地表径流, 引起严重的土壤侵蚀, 导致可为作物利用的降水减少^[1-5]。

PAM 是抑制土壤结皮, 保持良好的土壤结构增加降雨入渗的有效方法。已有的研究证实, 用 PAM (聚丙烯

酰胺) (Polyacrylamide) 可以减少结皮形成, 增加土壤的入渗率^[5-11]、减少土壤侵蚀。而在黄土地区, 渗入土壤的降雨, 可以保存在作物根区内, 为作物吸收利用, 从而提高作物的产量。

本研究的目的是, 根据已有的 PAM 室内、田间实验数据, 通过对作物水分生产函数的理论分析, 定量分析用 PAM 提高作物产量的经济性。分析将以黄土地区最主要的农作物——玉米为例。

1 作物水分生产函数分析

作物的水分生产函数用于描述作物耗水量(即农田地地表蒸发与作物蒸腾量之和)与作物产量间的关系。许多以收获子粒为目的的作物在一定耗水量范围内的水分生产函数可以近似地用线性函数描述^[12]

$$y = a + b \cdot ET \quad (1)$$

式中 y ——作物(子粒)产量, kg/hm²; ET ——作物生育期总蒸散量, 即耗水量, mm 或 cm; a, b ——经验系数。

式(1)中, $a < 0$, 意味着作物耗水达到一定数量以后才会形成(子粒)产量。同时, 式(1)中 $b > 0$, 即在一定范围内, 作物的产量将随耗水量的增加成比例增加; 而 a, b 的量值大小与很多因素有关, 如作物的品种特性、气候条件、土壤条件、栽培管理等。作物可以形成产量的耗水量, 由式(1)令 $y = 0$, 确定如下

$$ET_{\text{临界}} = -a/b \quad (2)$$

由式(1)确定的作物水分生产函数表明, 只有当作物实际的蒸散量大于式(2)确定的临界蒸散量($ET_{\text{临界}}$)后才会形成有效产量, 小于该值的耗水量为维持作物生命活动或营养生长所需的水量。

下述给出一个例子, 说明作物产量函数关系。Kallsen^[12]等在美国新墨西哥州通过大量的试验得到的玉米水分生产函数关系, 如下

$$y = 7309 + 238.9ET \quad (3)$$

式中 y ——玉米(子粒)产量, kg/hm²; ET ——玉米生育期总蒸散量(即蒸发与蒸腾量之和), cm;

收稿日期: 2003-03-01 修订日期: 2004-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(50179035); 中国科学院“百人计划”

作者简介: 陆军(1966-), 上海人, 理学硕士, 北京市海淀区清华东路 17 号中国农业大学东区 151 信箱 中国农业大学中国—以色列国际农业培训中心, 100083

通讯作者: 黄兴法, 副教授, 北京市海淀区清华东路 17 号中国农业大学东区 146 信箱 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

$a = -7309, b = 238.9$ 。式(3)的使用范围为: $ET = 0 \sim 80$ cm, 实验数据的回归相关系数为 $R^2 = 0.9$ 。

将式(3)用图直观地表示如图 1。

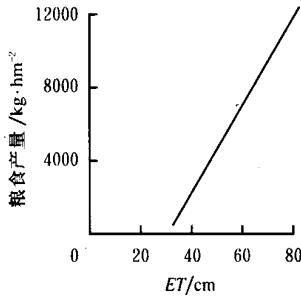


图 1 玉米的作物水分生产函数

Fig 1 Water production function of corn

由式(2)、(3)得到(新墨西哥地区)玉米的临界耗水量为

$$ET_{\text{临界}} = -a/b = 7309/238.9 = 30.6 \quad (4)$$

式(4)说明,在美国新墨西哥地区,试验所用的玉米品种,试验采用的栽培管理(包括水肥管理)条件下,玉米的耗水达到 30.6 cm 才开始形成(子粒)产量。而式(3)中直线的斜率表明,在同样的条件下,玉米耗水每增加 1 cm,产量则增加 239 kg/hm²。

我国华北地区的玉米水分生产函数^[13]表明,夏玉米耗水每增加 1 cm,产量平均增加 331.5 kg/hm²(此数即为华北地区的平均 b 值),即增加的水量产生的增产效果更好。

2 PAM 增加降雨入渗与提高旱作作物产量的意义

我国特别是位于西北地区的旱作农业区,大部分地区由于自然条件(水源、地形、地貌)和社会经济条件的限制,无法实现灌溉,作物生产完全靠降水。降雨总量不足以满足作物生长潜力的需求,但很多农作区降雨量可达到 350~500 mm,可能形成经济的产量。这时,如果在降雨时土壤表面产生结皮而产生水的流失,会使产量更加降低,平均单产仅为 750~1000 kg/hm²。从理论上讲,当作物的耗水量超过了作物形成产量的临界耗水量时,如果再增加水分的供给,作物的产量将沿着水分生产函数直线成比例上升,即单位耗水量的增加,将产生 b (式(1))公斤的产量。即由式(1)有

$$\Delta y = b \cdot \Delta ET \quad (5)$$

式中 Δy ——增产产量, kg/hm²; ΔET ——作物耗水量增量, cm。

唐泽军、雷廷武^[6]等人在室内用黄绵土进行的人工模拟降雨试验研究表明,雨强小于 100 mm·h⁻¹时, PAM 覆盖率 80%、用量 10 kg/hm² 时,可在各种坡度条件下获得很好的径流量减少的效果,一般在 70% 左右。Yu 和 Lei^[14]等人在以色列用黄土进行的研究也表明,试用 20 kg/hm² 的 PAM,当一次降雨量为 30 mm 时,可减少径流 83%,而一次降雨量达 75 mm 时,可以减少径流约 70%。

黄土地区的径流系数一般 0.2~0.4,农地径流系

数一般偏大一些,降雨量小、雨强小的地区径流系数偏小一些。为保守起见,在以下的经济性估计中,取径流系数为 0.2~0.3。从而,可以得到使用 PAM 后减少径流或增加作物可用水量的估计值为

$$\Delta ET = \lambda \cdot \beta \cdot P \quad (6)$$

式中 ΔET ——使用 PAM 减少的径流量或增加的作物耗水量, cm; λ ——径流系数, $\lambda = 0.2 \sim 0.3$; β ——使用 PAM 后径流减少率,可取 $\beta = 50\% \sim 70\%$ ^[1,6,9,10]; P ——年降雨量, cm。式(6)表明,旱作农业区作物耗水量可以通过使用将流失的水量(λP)的 β 部分转换成可为作物蒸散的水分。

从而使用 PAM 后的增产量为

$$\Delta y = b \cdot \lambda \cdot \beta \cdot P \quad (7)$$

3 施用 PAM 的经济性评价

施用 PAM 的经济效益,为施用 PAM 后增加的收入扣除使用 PAM 的成本,估计如下

$$R = p \cdot \Delta y - C \quad (8)$$

式中 R ——经济效益,元/hm²; C ——使用 PAM 的成本和其他生产成本的和(包括材料费、施用 PAM 的劳动力成本——可以忽略不计、产量增加所需的肥料成本、以及其他成本),元/hm²; Δy ——增产产量, kg/hm²; p ——产出物的价格,元/kg。将式(7)代入式(8)得到

$$R = p \cdot b \cdot \lambda \cdot \beta \cdot P - C \quad (9)$$

为了便于讨论和计算比较,将式(9)作变换得到下式

$$R = C \left[\frac{p}{C} \cdot b \cdot \lambda \cdot \beta \cdot P - 1 \right] \quad (10)$$

当使用 PAM 在经济上是可行的,必须满足 $R > 0$,或者等价地有下述表达式

$$f = \frac{p}{C} \cdot b \cdot \lambda \cdot \beta \cdot P - 1 > 0 \quad (11)$$

式(11)表达了使用 PAM 是否经济可行的标准。当 $f > 0$ 时,使用 PAM 是经济可行的,同时由于

$$f = \frac{R}{C} \quad (12)$$

式(12)表示, f 值实际上是使用 PAM 后产生的效益相对于成本的比值,即收益率。该值越大,说明使用 PAM 的收益越高,经济效果越好。由式(11)对各个影响 f 的相关因素讨论如下。由式(11)可知,当 p/C 增大时,对于提高效益是有效的,为此需要作物的价格较高,如用于价格较高的作物或某一给定的作物价格升高时效果会变得更好;另外使 p/C 值变大的可能是 C 值减小,如 PAM 的价格降低或施用方法简化, PAM 的成本会因为国产化或使用批量加大而大幅下降。式(11)中 b 值加大也是有益的,该值受作物种类和栽培管理(特别是与提高水的利用效率的措施有关)影响。式(11)中的 λ 值,受土壤、地形地貌、水土保持等因素的影响,该因素表明 PAM 在径流系数较大的地区(如黄土地区)使用是很好的。式(11)的 β 表明,减少径流的效果越高使用 PAM 的效益越好,因此应采取有效的方法提高 PAM 减少径流,减少径流的效果与 PAM 的用量有很大关系,但用量过大又会使 p/C 减小,因此有必要因地

制宜, 优化 PAM 的用量。同时式(11)还表示, 在一定范围内降雨量的增加对于提高 PAM 的效果是有效的, 一个地区的降雨量是一定的, 不可人为改变, 只可能解释为 PAM 用于降雨量相对较大的地区更有效。

将式(11)赋以上述讨论的有关数据后, 以降雨量

(即不同地区)和作物价格与 PAM 使用成本比(p/C)为变量计算得到的不同条件下的 f 列入表 1、表 2。表 1 与表 2 不同处只是 λ 和 β 的取值。表 1 中取 $\lambda = 0.2, \beta = 50\%$; 表 2 中则取 $\lambda = 0.3, \beta = 70\%$ 。

表 1 $\lambda = 0.2, \beta = 50\%$ 条件下使用 PAM 的经济效益 f

Table 1 Economic benefit f of using PAM under conditions of $\lambda = 0.2, \beta = 50\%$

p/C	年降雨量 P/cm						
	35	37	39	41	43	45	47
0.000515	- 0.5689	- 0.54426	- 0.51963	- 0.495	- 0.47036	- 0.44573	- 0.42109
0.001134	- 0.05158	0.002618	0.056814	0.11101	0.165205	0.219401	0.273596
0.002494	1.08653	1.205761	1.324991	1.444221	1.563452	1.682682	1.801912
0.005488	3.590367	3.852673	4.11498	4.377287	4.639594	4.9019	5.164207
0.012073	9.098807	9.675882	10.25296	10.83003	11.40711	11.98418	12.56126

表 2 $\lambda = 0.3, \beta = 70\%$ 条件下使用 PAM 的经济效益 f

Table 2 Economic benefit f of using PAM under conditions of $\lambda = 0.3, \beta = 70\%$

p/C	年降雨量 P/cm						
	35	37	39	41	43	45	47
0.000515	- 0.09469	- 0.04296	0.008777	0.060509	0.112241	0.163974	0.215706
0.001134	0.991688	1.105499	1.21931	1.33312	1.446931	1.560742	1.674553
0.002494	3.381714	3.632097	3.882481	4.132865	4.383248	4.633632	4.884016
0.005488	8.63977	9.190614	9.741458	10.2923	10.84315	11.39399	11.94483
0.012073	20.20749	21.41935	22.63121	23.84307	25.05492	26.26678	27.47864

表 1 和表 2 中的数据不仅提供了使用 PAM 的经济性标准, 还定量给出了经济效益的大小。应该指出表 1 和表 2 中的数据是与作物无关的。由表 1、2 可见, f 值随 p/C 和 P 的增大而增加。

以下讨论在选定作物为玉米、现有(进口, 2002 年) PAM 价格的情况下, 使用 PAM 的效益。设当前的玉米价格为 0.8 元/kg, 国际上 PAM 的价格为 16~20 元/kg, 黄土高原地区径流系数设为 0.2~0.3(农耕地径流系数实际高于此数), PAM 减少径流的效果为 50%~70%, 根据唐泽军、雷廷武等人的结果^[6], PAM 用量为 8 kg/hm²。则 $p/C = 0.8/(8 \times (16 \sim 20)) = 0.005 \sim 0.00625$ 。由表 1 可见, 当降雨量由 35 cm 增大到 47 cm 时, $f = 3.5 \sim 5.2$ 。由表 2 可见, 当降雨量由 35 cm 增大到 47 cm 时, $f = 8.7 \sim 11.9$ 。即, 使用 PAM 种植玉米, 产生的经济效益是 PAM 使用成本的 3.5~12 倍。从而可见在黄土旱作农业区应用 PAM 有很好的经济性。

应该指出, 使用 PAM 后, 不仅增加了降雨入渗和减少径流, 还可以大大减少土壤侵蚀(达 95%~99%)^[7]。土壤侵蚀减少会产生很好的生态效果, 还可以减少养分的流失, 降低肥料成本, 减少土地退化。当作物子粒产量增加时, 作物秸秆的产量也会增加, 秸秆可以用作牲口青储饲料。在上述经济分析中, 未计入该部分效益。并且, 由于 PAM 使降雨入渗增加, 在持续干旱的情况下, 增加的水分可以延缓作物受旱的时间, 减少因干旱造成绝产的威胁^[15], 为可持续农业发展提供条件。

4 结 论

综上所述, 使用 PAM 可以提高降雨入渗, 减少径流, 减少土壤侵蚀。在保护生态环境的同时, 可以提高作物的产量。由定量分析表明, 采用 PAM 在黄土地区种植玉米, 根据 2002 年成本及产品价格估算, 仅子粒产量增加一项, 就可以产生 3.5~12 倍于 PAM 使用成本的回报。PAM 还可以减少干旱对农业生产的威胁。可见, PAM 用于黄土地区旱作农业, 在经济和生态意义上都是可行的。应加以推广应用。

[参 考 文 献]

- [1] 唐泽军, 雷廷武. PAM 作用下土壤结皮形成的机制及其对入渗和水土流失的影响[J]. 生态学报, 2002(3): 674-681.
- [2] Duley F I. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1939, 4: 60-64.
- [3] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of soil surface crusts formed by simulated rainfall[J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, 48: 1137-1143.
- [4] Giménez D, Dirksen C, Miedema R, et al. Surface sealing and hydraulic conductance under varying-intensity rains[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 234-242.
- [5] Smith H J C, Levy G J, Shainberg I. Water droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 1084-1087.
- [6] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯等. 用 PAM 增加降雨入渗减少土壤侵蚀的室内试验研究—I: 入渗[J]. 土壤学报, 2003(2): 178-185.

- [7] 雷廷武, 唐泽军, 张晴雯, 等. 用PAM增加降雨入渗减少土壤侵蚀的室内试验研究—II: 侵蚀[J]. 土壤学报, 2003(3): 401-406
- [8] Nadler A, Perfect E, Kay B D. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 555-561.
- [9] Beh-hur M, Letey J. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration[J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 233-238
- [10] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effect on water infiltration and soil aggregation[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 565-570
- [11] Aly SM, Letey J. Physical properties of sodium-treated soil as affected by two polymers[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 501-504
- [12] Kallsen C E, Gregory E J, Sammis T W. Water use production functions of selected agronomic crops in northwestern New Mexico, Phase III WRR I Report No 159 New Mexico State University 1983
- [13] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995
- [14] Jian Yu, Lei T, I Shainberg, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 630-636
- [15] 唐泽军. PAM增加降雨入渗控制土壤侵蚀及稀土元素示踪土壤侵蚀过程的研究[D]. 中国农业大学, 2002. 6

Economic feasibility of PAM application in rain-fed agriculture in the loess regions of Northwest China

Lu Jun¹, Huang Xingfa², Tang Zejun², Zhan Weihua³

(1. China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: There is a vast rain-fed agricultural (dryland farming) region in the Northwest China, with low and unstable yield. Water shortage is the main restriction responsible for low crop yield. It is well known that surface application of PAM (Polyacrylamide) can increase rainfall infiltration, which increases crop yield. The objective of this study was to investigate the economic feasibility of applying PAM in rain-fed agriculture, through theoretical analysis and with experimental data. From crop water production function, the relationship between increased infiltration of rainfall through PAM application and the increased yield was developed. Experimental data were used to quantify the increased water availability to crop under PAM treatment. A function was derived for computing the economical benefits of PAM application under different conditions, such as annual precipitation, the ratio of crop price to PAM cost. The relevant data were used to calculate the economic benefit of using PAM in corn production. The results indicate that PAM application in corn has sound economic return, which demonstrate great potential of using PAM in rain-fed agriculture in the loess regions of North Western China.

Key words: polyacrylamide; loess regions; rain-fed agriculture; economic feasibility; corn