

线辣椒苗期适宜的土壤水分下限与灌水指标研究

马 甜, 范兴科^{2*}, 吴普特²

(1. 深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518036; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 应用盆栽试验研究了线辣椒苗期土壤水分下限、灌水上限对后期产量的协同效应, 结果表明: 灌水上限与土壤水分下限对线辣椒产量有明显的正效应和交互效应, 灌水上限主效应为土壤水分下限主效应的 1.65 倍; 线辣椒灌水上限与土壤水分下限之间的效应函数为报酬递减函数, 灌水上限与土壤水分下限效应存在一个合理协同区域, 灌水上限为 62% ~ 84.1%, 土壤水分下限为 40% ~ 49%; 在上述协同区域内, 提高灌水上限、土壤水分下限均能起到增产的目的, 且两因素之间的作用具有补偿性, 即灌水上限(或土壤水分下限)的降低可以通过增加土壤水分下限(或灌水上限)的水平保证产量不减; 本盆栽试验线辣椒获得最大产量的适宜灌水上限为相当于田间持水量的 84.1%, 土壤水分下限为相当于田间持水量的 49%。

关键词: 线辣椒; 苗期; 灌水指标; 土壤水分; 二次回归正交旋转试验

中图分类号: S274.1; S641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0074-05

Study of soil moisture lower limits and irrigation index at seedling stage of capsicum

MA Tian¹, FAN Xing-ke^{2*}, WU Pu-te²

(1. Shenzhen Water Planning and Design Institute, Shenzhen, Guangdong 518036, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on pot experiment, this paper studied coordinative effects of soil moisture lower limits and irrigation upper limit at seedling stage on the late stage yield of capsicum. The results showed that irrigation upper limit and soil moisture lower limits had obvious positive and interactive effects to capsicum yield. Main effect of upper irrigation limit was 1.65 times higher than that of lower moisture limit. Upper irrigation limit and soil moisture lower limit satisfied Diminishing Returns function. There was a reasonable coordinative zone between irrigation upper limit and soil moisture lower limit. For irrigation upper limit, rational range was from 62% to 84.1%; For the soil moisture lower limit, it was from 40% to 49%. In these rational ranges, increasing either irrigation upper limit or soil moisture lower limit could increase capsicum yield, and effect of upper irrigation limit and lower moisture limit were compensated each other in those ranges. In other words, decreasing irrigation upper limit (or moisture lower limit) could be compensated by increasing moisture lower limit (or irrigation upper limit) to maintain a stable and no-decreasing yield. The appropriate irrigation upper limit and soil moisture lower limit for potted capsicum of maximum yield were 84.1% and 49% of field capacity, respectively.

Keywords: capsicum; seedling stage; irrigation index; soil moisture; quadratic rotation-orthogonal regressive combination design

土壤水分是植物生长发育不可缺少的物质基础。在干旱缺水时, 常常通过灌溉来补充土壤水分。土壤水分下限、灌水上限不仅直接决定灌水量的多少, 而且影响干旱胁迫程度以及复水后作物的生长状况。近年来, 关于农作物土壤水分上、下限指标的

研究越来越多, 土壤水分下限越低, 作物承受的干旱胁迫程度越大, 对作物的生长发育、生理特性以及产量影响也越大, 适宜的土壤水分下限不仅能够节约灌水而且可以提高产量。作物经受胁迫锻炼, 通过复水可以消除干旱胁迫带来的某些伤害, 适宜的灌

收稿日期: 2012-12-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“半干旱地区农业高效用水的生物学原理及其应用”(KICX3-SW-444)

作者简介: 马 甜(1981—), 女, 汉族, 山东菏泽人, 工程师, 主要从事节水灌溉新技术与新方法研究。E-mail: matian0508@163.com。

* 通信作者: 范兴科(1964—), 男, 汉族, 陕西岐山人, 研究员, 主要从事节水灌溉新技术和灌溉产品开发。E-mail: gjzfxk@vip.sina.com。

水上限(本文指适宜的灌水水平)能够促进作物的生长、提高产量以及水分利用效率。孙景生(1998)的研究表明:在土壤水分的高值区域,当土壤含水量高于 19.2%(相当于田间持水量的 80%)时,小麦的光合速率达到最大而后下降,所以将 19.2%所对应的土壤水分值作为小麦的上限指标;当土壤水分不低于 14%(相当于田间持水量的 58.3%)时,光合速率下降不会太多,不会产生破坏性的影响,土壤水分对气孔阻力的影响几乎等效,故将此值定为小麦土壤水分的下限^[1]。俞希根等通过研究确定了在节水灌溉条件下棉花生育阶段适宜土壤水分下限(为田间最大持水量百分数):苗期为 55%、蕾期为 60%、花铃期为 70%、成熟期为 55%^[2]。适宜的土壤水分下限造成作物土壤水分的适度亏缺,很多研究表明,作物土壤水分的适度亏缺能够提高作物产量和水分利用效率^[3-8]。在黄土高原地区,土壤有效水分供应不足,土壤肥力低下和严重的土壤侵蚀等问题长期困扰着该区的农业发展,有限水资源的高效利用、植物的优化施肥以及高产节水型农业的实施是该区农业发展的主要目标。

二次回归正交旋转试验可以模拟多个因素对产量影响的关系模型,通过对模型的解析和优化,直接选择最优试验点或最佳控制区域^[9]。20 个世纪 80 年代后,它作为一种试验方法被用在农业试验设计工作中^[10-11]。陈国良、穆兴民等首次利用二次回归正交旋转组合试验设计模拟水肥耦合对沙打旺产草量的协同效应,试验表明:水肥耦合对作物产量的影响存在一个协同区域,水分、施肥量的合理组合,才能保证水肥协同增产,在这一范围,肥力的降低可以通过增加水分来补偿,以达到相同的产量水平^[12]。结合前人对水肥耦合和低定额灌溉制度研究,本文将灌水上限、土壤水分下限的不同水平应用于二次回归正交旋转试验设计,在作物常规施肥的条件下,以期寻找灌水上限、土壤水分下限的协同效应区域和最优试验点,为黄土高原干旱和半干旱气候条件下线辣椒的节水或高产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验盆及土壤特点

试验于 2006 年在陕西杨凌渭河三级阶地实施,在遮雨棚下进行盆栽试验。盆体上口直径为 30 cm,盆高 27 cm,盆底铺有粒径小于 2 cm 的砾石,砾石上覆单层吸水纸,斜靠盆沿插入内径 1.6 cm、长 32 cm 的 PVC 管,使管一端透过吸水纸接触处于盆底中央的砾石,另一端高出盆沿 4 cm,通过此管向

盆内补充灌水,控制盆内土壤水分水平。试验所用土壤采用附近农田的耕层沙壤土,风干过筛,土壤容重为 1.49 g·cm⁻³,田间持水量为 18%。称取风干土重 10 kg,并将 10 g 复合肥及适量杀菌药加入其中,搅拌均匀后装入盆内。

1.2 材料与方法

试验对象为 2166 线辣椒,它是生长于黄土高原的一种主要辣椒品种,株型矮小,抗旱性强。结合当地种植辣椒的经验,本试验于 3 月初育苗,5 月 20 号移栽,选生长均匀的线辣椒幼苗,每盆 1 穴栽植 3 株,适当灌水以保证线辣椒的存活,每盆补水量相同,使得前期含水量一致。6 月 12 日开始控水处理,7 月 6 日(每处理均开花)结束苗期控水试验,9 月 15 日结束全生育期灌水。试验设计苗期土壤水分下限含水量分别为田间持水量的 70%、60%、55%、50%、45%和 40%,共 6 个处理,灌水上限为田间持水量的 80%,其它生育期的土壤水分上下限分别控制为田间持水量的 55%和 80%。当每个处理的土壤水分含量下降到水分控制下限时即进行灌水,使其含水量达到田间持水量的 80%,除苗期外,其它生育期土壤含水量降到田间持水量的 55%时即开始灌水至上限。

本试验采用二因素五水平的二次回归正交旋转试验设计,共 16 个处理,除 0 水平外的其它 8 个处理重复三次,试验因素为灌水上限含水量(X_1)与土壤水分下限含水量(X_2),见表 1。为寻找线辣椒苗期的适宜灌水上限和土壤水分下限,所以只对线辣椒苗期实施二次回归正交旋转试验方案,开花期和团果期按照二次回归正交旋转试验设计中的 0-0 水平控制。在线辣椒的全生育期内,隔日用 1 g 感量的电子秤称量盆重,线辣椒成熟后随时收获,用 0.01 g 感量电子秤称其鲜重并记录。试验结束后,统计经济产量。

表 1 试验因素的水平编码值
Table 1 The level number of experiment factors

编码值 Number	线辣椒苗期两因素正交旋转组合试验设计 Quadratic rotation-orthogonal regressive combination design during the seedling period of capsicum	
	灌水上限	土壤水分下限
	Upper irrigation level(X_1)	Lower limit of soil moisture(X_2)
1.414	0.92	0.55
1	0.876	0.528
0	0.77	0.475
-1	0.664	0.422
-1.414	0.62	0.4

1.3 数据分析

试验数据的分析计算采用 Excel 软件, 偏相关分析采用 SPSS 13.0 统计分析软件, 并对各处理数据进行显著性检验。对二次回归正交旋转组合设计的解析和优化采用农业试验统计分析软件来模拟产量与灌水上限、土壤水分下限的多元回归模型。

2 结果与分析

2.1 灌水上限与土壤水分下限对线辣椒产量的效应

灌水上限与土壤水分下限的高低决定了作物的灌水量, 是实施有限灌溉的基本依据, 影响作物产量的高低。一般灌水上限与土壤水分下限对产量的效应分为主效应和交互效应, 为分析各项效应大小, 各处理线辣椒平均每株的产量如表 2。根据表 2 结果, 建立了线辣椒产量与灌水上限、土壤水分下限的效应方程(1):

$$Y = 20.34 + 2.62X_1 + 1.59X_2 + 1.38X_1X_2 \quad (1)$$

式中, Y 为平均每株的产量($g \cdot 株^{-1}$); X_1 为灌水上限; X_2 为土壤水分下限(X_1 、 X_2 均为编码值)。

表 2 试验处理与每株的产量
Table 2 The treatment and the yield of each plant

处理 Treatments	灌水上限 Upper irrigation level (X_1)	土壤水分下限 Lower limit of soil moisture (X_2)	产量 Yield /($g \cdot plant^{-1}$)
1	1	1	25.24
2	1	-1	17.00
3	-1	1	15.31
4	-1	-1	12.61
5	1.414	0	20.98
6	-1.414	0	16.28
7	0	1.414	15.12
8	0	-1.414	13.84
9	0	0	25.47
10	0	0	20.93
11	0	0	23.20
12	0	0	24.33
13	0	0	22.06
14	0	0	24.90
15	0	0	23.76
16	0	0	24.33

方程(1)的回归平方和为 82.932, 残差平方和为 225.735, F 检验值为 1.47, $F > F_{0.273}$, 在 $sig. = 0.273$ 时显著。表明灌水上限、土壤水分下限指标及两因素的交互作用的单因素效应在 0.273 水平下显著。

表 3 灌水上限、土壤水分下限单项及交互项与产量的偏相关系数

Table 3 The partial correlation coefficient between the upper irrigation level, the lower limits of soil moisture, the alternation of the two factors and capsicum's yield

因子 Factors	相关系数 Correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient	实际显著性概率 Practical significance probability
$r_{1,y23}$	0.422	0.443	0.113
$r_{2,y13}$	0.257	0.287	0.319
$r_{3,y12}$	0.157	0.181	0.536

注: 1) 表中 1 表示灌水上限指标; 2 表示土壤水分下限指标; 3 表示灌水上限指标和土壤水分下限指标的交互项; y 为线辣椒产量。

2) $r_{1,y23}$ 表示土壤水分下限指标(2)、两因素交互项(3)固定时, 灌水上限指标(1)与线辣椒产量的偏相关系数。灌水上限指标与土壤水分下限指标对线辣椒产量的偏相关系数, 即固定灌水上限指标(1)、土壤水分下限指标(2)及两因素的交互项(3)三项中的任两项, 求另一项与产量的相关系数(表 3)。

Note: 1) 1 is the upper irrigation index; 2 is the lower limit index of soil moisture; 3 represents the alternation of upper irrigation index and lower limit index of soil moisture; y is the capsicum's yield.

2) $r_{1,y23}$ indicates the partial correlation coefficient between upper irrigation index (1) and capsicum's yield (y) when the lower limit index of soil moisture (2) and the alternation of upper irrigation index and lower limit index of soil moisture (3) are constant. The partial correlation coefficients between factors of 1, 2, 3 and y are the partial correlation coefficient between capsicum's yield and any factor of 1, 2 and 3 when two factors of them are constant.

线辣椒与灌水上限、土壤水分下限的相关性分析表明: 在本试验条件下, 线辣椒的产量与灌水上限、土壤水分下限以及两因素的交互作用均呈正相关, 灌水上限对线辣椒的产量有较显著的正效应。据方程(1)可知, 灌水上限的主效应为 2.62, 土壤水分下限的主效应为 1.59, 两因素交互主效应为 1.38。其中, 灌水上限效应为土壤水分下限效应的 1.65 倍。

2.2 灌水上限、土壤水分下限对线辣椒产量的效应函数

据表 2 建立的线辣椒产量与灌水上限、土壤水分下限的多项式回归效应方程为:

$$Y = 23.62 + 2.62X_1 + 1.59X_2 + 1.38X_1X_2 - 2.25X_1^2 - 4.32X_2^2 \quad (2)$$

式中, Y 为平均每株的产量($g \cdot 株^{-1}$); X_1 为灌水上限; X_2 为土壤水分下限(均为编码值)。

回归方程的失拟均方为 6.5690, 误差均方为 2.2775, $F_1 = 2.88447 < F_{0.01} = 8.4513$, F_1 检验不显著, 表明回归方程的拟合程度较好, 可进行 F_2 检验, 回归均方为 54.6035, 剩余均方为 3.5649, $F_2 = 15.3168 > F_{0.01}(2, 16) = 5.6363$, F_2 达极显著水平,

即灌水上限与土壤水分下限主效应对线辣椒产量有极显著的影响,表明方程(2)已达极显著水平,它可用于预测与控制田间生产,在95%置信度概率时, Y 的预测置信区间为 $Y \pm 2Sr = Y \pm 4.55(g \cdot 株^{-1})$ 。

2.2.1 线辣椒最高产量及最适土壤水分下限和灌水量上限 方程(2)中的二次项系数均为负值,表明:在本试验条件下,两个因素的效应属报酬递减性函数,随着土壤水分下限、灌水上限水平的增加,产量呈先增加后降低,方程存在最适灌水上限和土壤水分最适下限。判断回归方程(2)有最大值,其驻点应满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 2.62 + 1.38X_2 - 4.5X_1 = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 1.59 + 1.38X_1 - 8.64X_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

解方程组得: $X_1 = 0.67$,对应的灌水上限为84.1%;
 $X_2 = 0.29$,对应的土壤水分下限为49%,在驻点(0.67,0.29)时, $Y_{max} = 24.73 g \cdot 株^{-1}$ 。

2.2.2 线辣椒产量等产线图及其应用 水分效应曲面上,产量相等的各点连线在水平面上的垂直投影线为等产量线。利用方程(2)绘制线辣椒产量与灌水上限、土壤水分下限关系的等产线图。据坐标旋转法则,在直角坐标系中,方程(2)的等产线图为一椭圆(图1)。

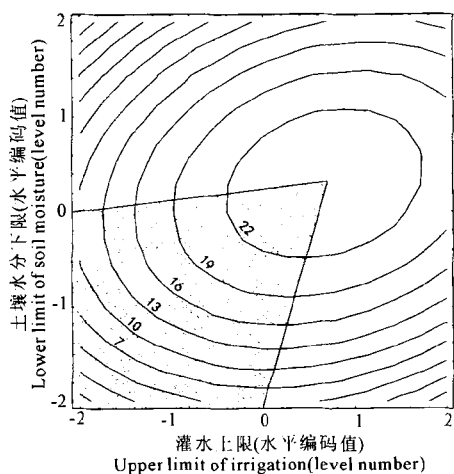


图1 线辣椒灌水上限与土壤水分下限协同效应等产线/(g·株⁻¹)

Fig.1 The isotimic surface of coordinative effect of the upper irrigation level and the lower limit of soil moisture on capsicum's yield

研究表明,灌水上限指标与土壤水分下限指标存在交互效应(图1)。土壤水分下限一定时,随着灌水上限由低到高的变化,线辣椒的产量存在一个

最大值,即线辣椒的产量最初随灌水上限的提高而增加,但当灌水上限到达某一水平时,产量达到最高,随后又随灌水上限的增加而减少(图2)。土壤水分下限除-1.414、-1水平以外的其它各水平,当灌水上限的水平编码为1时线辣椒的产量最大,产量最大值为23.99 g·株⁻¹,此时土壤水分下限为0水平,灌水上限为1水平;当土壤水分下限为-1.414、-1水平,灌水上限为0水平时,线辣椒产量最大为17.71 g·株⁻¹。土壤水分下限水平由-1.414提高到1.414,灌水上限水平由-1.414提高到0水平,灌水上限的增产效率逐渐增大,产量平均增加8.20 g·株⁻¹,而灌水上限水平由0提高到1.414水平,灌水上限增产效率降低,产量平均减产1.16 g·株⁻¹。

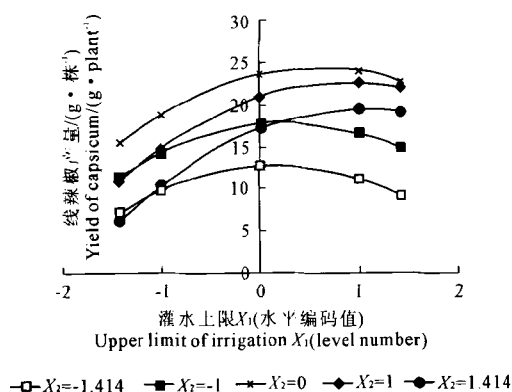


图2 灌水上限对线辣椒产量的效应

Fig.2 The effect of the irrigation upper level on capsicum's yield

同时,土壤水分下限对产量的效应与灌水上限对产量的效应相似(图3)。灌水上限一定时,线辣椒产量随土壤水分下限的提高先增加后减少,土壤水分下限为0水平时,产量最大,土壤水分下限增产效率随土壤水分下限水平编码的提高先增加后减小,土壤水分下限由-1提高到0水平时,增产效率最高,平均增产10.89 g·株⁻¹;土壤水分下限由0提高到1.414水平,产量降低,减产率逐渐增大,平均减产6.39 g·株⁻¹。

2.2.3 灌水上限与土壤水分下限的合理协同区 提高灌水上限和土壤水分下限,对线辣椒产量有明显的增产效果,其效应函数为报酬递减性函数。若两因素的水平控制不合理,则可能达不到预期增产的效果或导致减产,灌水上限、土壤水分下限的合理协同区应满足以下条件:

$$\begin{cases} 23.62 + 2.62X_1 + 1.59X_2 + 1.38X_1X_2 \\ - 2.25X_1^2 - 4.32X_2^2 - Y = 0 \\ 2.62 + 1.38X_2 - 4.5X_1 \geq 0 \\ 1.59 + 1.38X_1 - 8.64X_2 \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

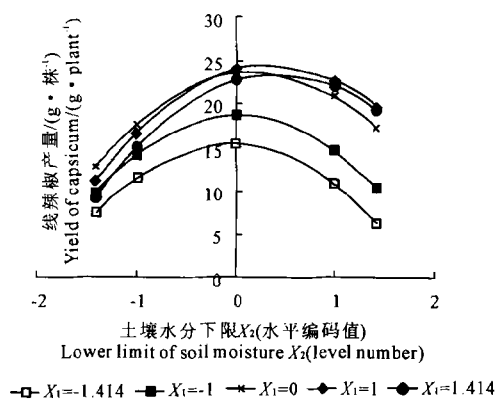


图 3 土壤水分下限对线辣椒产量效应

Fig.3 The effect of soil moisture lower limits on capsicum's yield

在等产线上,满足这一条件的为图 1 中的阴影部分,即两因素的合理协同区。

满足式(4)的条件,即图 1 中阴影部分时:(1)灌水上限、土壤水分下限的合理组合,才能保证灌水上限和土壤水分下限的协同增产;(2)在这一范围内,灌水上限、土壤水分下限中的任一因素的降低均可通过增加另一因素水平来补偿,可获得相同的产量。如图 1 中的三角形区域,弧线 AB 表示产量线等于 $19 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 的等产线,若灌水上限水平不变,土壤水分下限水平由 B 点降低到 C 点,那么产量会降低,为同样获得 $19 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 的产量,可增加灌水上限水平,使灌水上限水平由 C 点增加到 A 点。

在灌水上限与土壤水分下限水平的合理协同区内,可以根据任一因素(灌水上限水平、土壤水分下限水平)的供应状况,确定另一因素的最大控制水平以及最适控制水平。

3 结 语

1) 灌水上限、土壤水分下限的大小对线辣椒产量具有明显的正效应。二者之间也有明显的连应作用,灌水上限效应为土壤水分下限效应的 1.65 倍。

2) 根据灌水上限、土壤水分下限两因素模拟的多元回归方程,其最适灌水上限水平编码值为 0.67,

相当于田间持水量的 84.1%;最适土壤水分下限水平编码值为 0.29,相当于田间持水量的 49%,在驻点(0.67,0.29),可获得最大产量 $24.73 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

3) 灌水上限与土壤水分下限的协同效应存在一个合理组合区:灌水上限为 62% ~ 84.1%,土壤水分下限为 40% ~ 49% (均表示相当于田间持水量的百分数)。在这个组合区域内,灌水上限、土壤水分下限具有相互补偿作用,即灌水上限和土壤水分下限中的任一因素降低可通过增加另一因素水平来补偿,获得相同的产量。

参 考 文 献:

- [1] 孙景生,刘祖贵,肖俊夫,等.冬小麦节水灌溉的适宜土壤水分的上下限指标研究[J].中国农村水利水电,1998,(9):10-12.
- [2] 俞希根,孙景生,肖俊夫,等.棉花适宜土壤水分下限和干旱指标研究[J].棉花学报,1999,11(1):35-38.
- [3] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等.夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J].农业工程学报,1998,14(4):88-92.
- [4] 刘安能,孟兆江.玉米调亏灌溉效应及其优化农艺措施[J].农业工程学报,1998,15(3):107-112.
- [5] 康绍忠,史文娟,胡笑涛.调亏灌溉对玉米生理指标及水分生产效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(4):82-87.
- [6] 郭相平,刘才良,邵孝侯,等.调亏灌溉对玉米需水规律和水分生产效率的影响[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):92-96.
- [7] Kang Shaozhong, Zhang Lu, Liang Yinli, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2002,55:203-216.
- [8] Li Fengmin, Wang Ping, Wang Jun, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2004,67:77-88.
- [9] 马 永.回归旋转设计中的寻优方法及计算机实现[J].西北农业大学学报,1996,24(5):99-102.
- [10] 徐学选,陈国良,穆兴民.春小麦水肥产出协同效应研究[J].水土保持学报,1994,8(4):72-78.
- [11] 周桂霞,汪 春,张 伟,等.基于二次正交旋转回归试验的深松铲关键参数建模[J].农业机械学报,2006,37(10):86-89.
- [12] 陈国良,穆兴民,贾恒义,等.水肥对沙打旺产草量协同效应的初步研究[J].水土保持学报,1992,6(3):73-78.