

# 新修梯田培肥增产配套措施 模型研究

段建南 李栓怀 王改兰 张进峰

## 提 要

本研究在晋西北河曲县砖窑沟试验区设置了正交旋转组合设计试验,建立了新修梯田培肥增产配套措施的数学模型。通过对模型的分析与模拟选优,找出了新修梯田种植马铃薯配套措施的较优组合是:施纯氮8—12kg/亩,施磷<6kg/亩,施有机肥2600—4000kg/亩,播种密度2300—2800株/亩,亩产薯块可达到1000—1600kg。

修建水平梯田,是黄土高原保持水土、提高土地生产力的一项有效措施。但是,由于新修梯田3—5年内减产的影响,制约了这一措施的推行。所以,研究新修梯田培肥增产的配套措施,对加快黄土高原综合治理有十分重要的意义。

为此,1987年在晋西北河曲县砖窑沟流域综合治理试验区,开始了小区试验与大田调查研究,初步的结果是:在新修梯田生土地上,当年种植马铃薯,施有机肥1500—3000kg/亩,施碳铵50kg/亩,再配合适量的磷肥,可获得与原坡地相当或略高的产量;同时,表土肥力状况得到显著改善,连续培肥3年即可达到中等肥力水平。在此基础上,1988年又采用回归的旋转设计,建立了新修梯田种植马铃薯的培肥增产配套措施数学模型,探讨了最佳方案,以指导生产实践。

## 一、试验条件与方法

试验地设置在砖窑沟流域中部沙坪村安子梁1987年秋季机修水平梯田的生土地上,供试土壤母质属马兰黄土,轻壤质地,有机质含量为0.27—0.30%,全氮0.031—

表1 因子水平与编码

因子水平 编码 $X_{aj}$	$Z_1$ (氮肥) (kg/亩)	$Z_2$ (磷肥) (kg/亩)	$Z_3$ (有机肥) (kg/亩)	$Z_4$ (密度) (株/亩)
+2	16	12	4,000	3,000
+1	12	9	3,000	2,500
0	8	6	2,000	2,000
-1	4	3	1,000	1,500
-2	0	0	0	1,000
$\Delta_j$	4	3	1,000	500

注:  $X_{aj} = \frac{Z_{aj} - Z_{0j}}{\Delta_j}$  ( $a = -2, -1, 0, 1, 2; j = 1, 2, 3, 4$ )

0.043%，碱解氮9.59mg/100g土，全磷0.05%，速效磷4.5—6.3ppm。供试作物马铃薯品种是东北白。试验采用分成三个正交区组的四变量的二次正交旋转组合设计<sup>[1]</sup>，考察马铃薯薯块产量与施氮、磷、有机肥量和播种密度的关系。设计参数磷=4，r=2，氮=36， $m_0=16$ ， $m_r=8$ ， $m_0=12$ ， $W=3$ 。四个因子的设计水平与编码列于表1。

供试肥料：氮肥用尿素，磷肥用普钙，有机肥选用圈肥，含有机质9.90%，含氮0.411%、碱解氮35.35mg/100g土、全磷0.246%、速效磷170ppm。

试验共设36个小区，分成三个区组，区组内随机排列，小区面积 $4 \times 6 \text{ m}^2$ 。肥料按设计量作种肥一次施入，播种行距66.7cm，株距按设计密度要求而变化。

## 二、试验结果与分析

1. 试验结果的回归分析与显著性检验。根据表2的设计方案实施试验，得到的试验结果同时列于表2。

2 分成三个正交区组的四变量的二次正交旋转组合设计与试验结果

区 组 I						区 组 II						区 组 III					
试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Y (kg/亩)	试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Y (kg/亩)	试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Y (kg/亩)
1	-1	-1	-1	-1	493	13	-1	-1	-1	1	805	25	-2	0	0	0	761
2	1	-1	-1	1	1080	14	1	-1	-1	-1	740	26	2	0	0	0	1031
3	-1	1	-1	1	1030	15	-1	1	-1	-1	631	27	0	-2	0	0	854
4	1	1	-1	-1	869	16	1	1	-1	1	973	28	0	2	0	0	939
5	-1	-1	1	1	1215	17	-1	-1	1	-1	851	29	0	0	-2	0	815
6	1	-1	1	-1	949	18	1	-1	1	1	1198	30	0	0	2	0	1456
7	-1	1	1	-1	732	19	-1	1	1	1	916	31	0	0	0	-2	537
8	1	1	1	1	1200	20	1	1	1	-1	906	32	0	0	0	2	1003
9	0	0	0	0	938	21	0	0	0	0	877	33	0	0	0	0	1059
10	0	0	0	0	846	22	0	0	0	0	1003	34	0	0	0	0	1074
11	0	0	0	0	831	23	0	0	0	0	842	35	0	0	0	0	925
12	0	0	0	0	879	24	0	0	0	0	1062	36	0	0	0	0	1197

通过对试验区组效应的分离与F检验，结果：

$$F = \frac{SS_{\text{区}}/f_{\text{区}}}{SS_{\text{误}}/f_{\text{误}}} = 1.82 < F_{0.20}(2,9) = 1.9$$

说明区组间的差异不显著。然后经回归分析，求得对应于规范变量的二次回归方程：

$$Y = 961.1 + 73.8X_1 + 3.6X_2 + 109.9X_3 + 132X_4 - 18.3X_1^2 - 18.2X_2^2 + 41.5X_3^2 - 49.8X_4^2 + 2.9X_1X_2 - 10.9X_1X_3 - 16.4X_1X_4 - 53.4X_2X_3 - 17.1X_2X_4 - 4.6X_3X_4 \quad (1)$$

对回归方程(1)及回归系数的显著性检验结果：

$$F_1 = 0.70 < F_{0.25}(10, 11) = 1.52;$$

$$F_2 = 6.45 > F_{0.01}(24, 21) = 3.07.$$

表明二次回归方程与实际情况拟合良好, 模型(1)可以用来预报。方程中氮、有机肥与密度的一次效应达极显著水平, 生产中应充分重视。

**2. 单因子产量效应的解析。**应用降维法分别设模型(1)中其它三个因子为零水平时, 各个单因子对于产量效应的子模型为:

$$\hat{Y}_1 = 961.1 + 73.8X_1 - 18.3X_1^2 \quad (2)$$

$$\hat{Y}_2 = 961.1 + 3.6X_2 - 18.2X_2^2 \quad (3)$$

$$\hat{Y}_3 = 961.1 + 109.9X_3 + 41.5X_3^2 \quad (4)$$

$$\hat{Y}_4 = 961.1 + 132X_4 - 49.8X_4^2 \quad (5)$$

将式(2) — (5)表示到图1上, 可以看出氮( $X_1$ )、磷( $X_2$ )、密度( $X_4$ )三个因子分别对于产量效应的变化趋势相同, 属开口向下的抛物线型, 有机肥因子( $X_3$ )与产量的关系属于开口向上的抛物线型。各因子在设计区间内产量的变化幅度的大小表明了各因子对产量影响的大小, 依次为密度 > 有机肥 > 氮肥 > 磷肥。

由式(2) — (5)分别求各因子的一阶导数, 并作图进行边际产量效应的解析。由图2可以看出, 氮、磷、密度因子的边际产量随处理水平的增加而下降, 为报酬递减型; 有机肥因子的边际产量随处理水平的增加而上升, 属报酬递增型。图中每条直线的截距值表示了各因子水平均为零时, 边际产量的值, 其大小次序是:  $d\hat{Y}_4/dx_{04} > d\hat{Y}_3/dx_{03} > d\hat{Y}_1/dx_{01} > d\hat{Y}_2/dx_{02}$ , 表明在各因子零水平基础上提高产量的最有效途径, 首先是增加密度, 然后依次为增施有机肥、氮肥、磷肥。

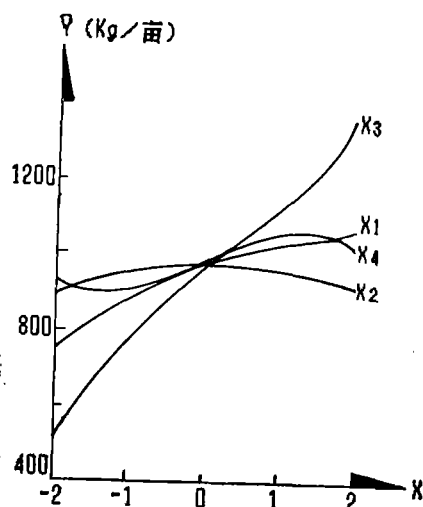


图1 其它因子取零水平时单因子的产量效应

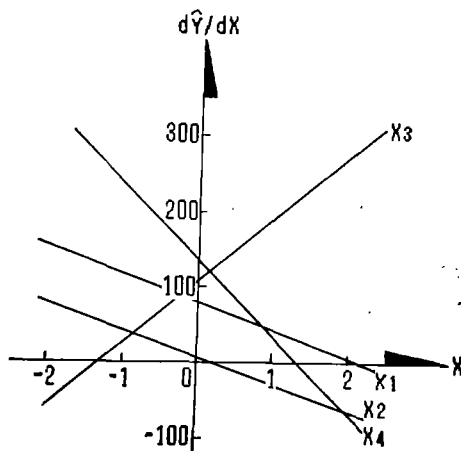


图2 其它因子取零水平时单因子的边际产量

**3. 双因子效应的解析。**同样采用降维法将模型(1)的任意两个因子固定在零水平, 可以得到两两因子相互作用对产量效应的六个回归子模型:

$$\hat{Y}_{12} = 961.1 + 73.8X_1 + 3.6X_2 - 18.3X_1^2 - 18.2X_2^2 + 2.9X_1X_2 \quad (6)$$

$$\hat{Y}_{13} = 961.1 + 73.3X_1 + 109.9X_3 - 18.3X_1^2 + 41.5X_3^2 - 10.9X_1X_3 \quad (7)$$

$$\hat{Y}_{14} = 961.1 + 73.8X_1 + 132X_4 - 18.3X_1^2 - 49.8X_4^2 - 16.4X_1X_4 \quad (8)$$

$$\hat{Y}_{23} = 961.1 + 3.6X_2 + 109.9X_3 - 18.2X_2^2 + 41.5X_3^2 - 53.4X_2X_3 \quad (9)$$

$$\hat{Y}_{24} = 961.1 + 3.6X_2 + 132X_4 - 18.2X_2^2 - 49.8X_4^2 - 17.1X_2X_4 \quad (10)$$

$$\hat{Y}_{34} = 961.1 + 109.9X_3 + 132X_4 + 41.5X_3^2 - 49.8X_4^2 - 4.6X_3X_4 \quad (11)$$

由式(6) — (11) 分别导出各式的二元二次效应的等产线方程式, 并对这些方程式进行二元二次方程图形与极值的数学判别, 结果可以将它们分成两类: 第一类模型等产线图形为椭圆型, 有极大值, 是由 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$ 三个因子中两两相互组成的子模型(6)、(8)、(10); 第二类模型等产线图形为双曲线型, 无极值, 是由 $X_3$ 分别与其它三个因子组成的子模型(7)、(9)、(11)。

将第二类双因子效应子模型(7)、(9)、(11) 分别作两因子对产量的效应图3、4、5。

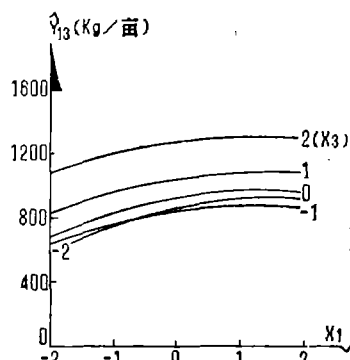


图3 不同有机肥水平下  
氮肥对产量的效应

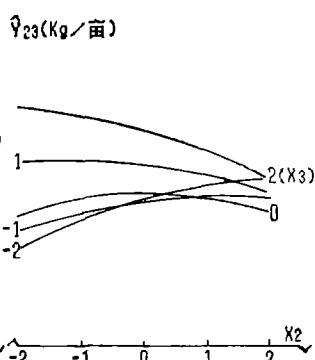


图4 不同有机肥水平下磷肥  
对产量的效应

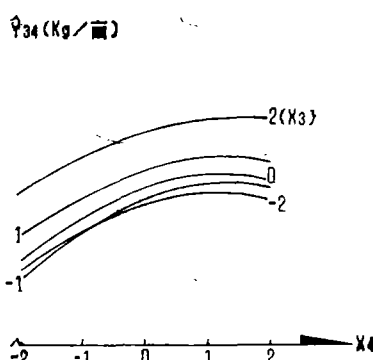


图5 不同有机肥水平下密  
度对产量的效应

从图3可以看出, 当有机肥因子取不同水平时, 氮因子对产量效应曲线的变化趋势, 近似于平行变化, 所以氮因子与有机肥因子没有明显的交互作用。要获得高产, 当有机肥因子确定在不同水平时, 氮因子均可取 $0 < X_1 < 2$ 水平之间; 反之, 当氮因子确定之后, 有机肥因子应取 $X_3 = 2$ 水平。经计算, 经济最佳施肥配比是:  $X_1 = 0.57$  (纯氮10.3kg/亩),  $X_3 = 2$  (有机肥4000kg/亩), 亩产量为1370.5kg。

从图4可以看出, 当两因子均在零水平以下时, 提高某一因子水平都可增产。当有机肥因子大于零水平时, 施磷肥反而减产, 而当磷因子大于零水平时, 有机肥的增产效果明显减少或出现减产现象。可见, 磷因子与有机肥因子有一定的负交互作用。因此, 在生产中有机肥充足时可不施磷肥, 只有当有机肥不足时, 施适量的磷肥才有增产效果。如, 有机肥因子取 $X_3 = 0.5$ 时 (2500kg/亩), 经济最佳施磷量为1.45kg/亩, 亩产量为1019.6kg,  $X_3 = 1-2$ 时 (3000—4000kg/亩) 不施磷, 亩产可达1139.3—1480.5kg。可见, 有机肥是一种多功能、高效益、低成本的肥料, 生产中应充分重视。

图5与图3相似, 可以看出, 有机肥与密度没有明显的交互作用。一般地, 有机肥因子取不同水平时, 密度可取 $0 < X_4 < 2$ 之间; 当密度取不同水平时, 有机肥因子取上限水平可获得高产。如有机肥因子 $X_3 = 2$ 时, 经济最佳密度 $X_4 = 0.98$  (2490株/亩), 当 $X_3 =$

1 时, 经济最佳密度  $X_4 = 1.03$  (2515 株/亩)。

上述分析可以看出, 要获得高产, 有机肥因子均应取设计区间的上限, 其它因子视不同情况, 氮因子可取 0—2 水平范围, 即每亩 8—16kg 纯氮; 磷因子可取  $X_2 < 0$  水平, 即每亩小于 6 kg 磷; 密度应取 0—2 水平之间, 即每亩产 2000—3000 株。

由第一类模型式 (6)、(8)、(10) 的等产线方程式绘出等产线图 6—图 8。图中直线 AG 和 GB 是等产线的两条脊线<sup>[2]</sup>, 其交点 G 为等产线图的极点; 直线 GF 为经济最佳配比线 (也称增产路线), GF 线上的 P 点为经济最佳措施配比点。

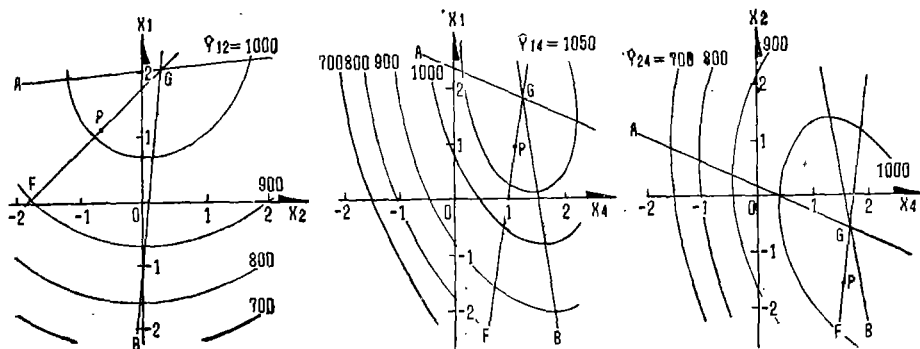


图6  $X_1$ 与 $X_2$ 两因子等产线 图7  $X_1$ 与 $X_4$ 两因子等产线 图8  $X_2$ 与 $X_4$ 两因子等产线

从图 6 可以看出, 两条脊线所包围的合理施肥区, 主要分布在  $X_1 < 2$  与  $X_2 < 0$  的区域, 即施纯氮在 16kg/亩以下, 纯磷在 6 kg/亩以下。两种养分的边际产量均大于零, 增施任一种养分均可增产。经济最佳配比线主要分布在高氮低磷区域 ( $0 < X_1 < 2$ ,  $X_2 < 0$ ), 经济最佳施肥量为纯氮 12.4kg/亩, 磷 3.9kg/亩, 氮与磷之比为 1 : 0.3, 亩产马铃薯 1006.9kg。

从图 7 可以看出, 施氮与密度的合理配比区范围较大, 而经济最佳配比线却主要分布在  $-2 < X_1 < 1.5$  和  $0.5 < X_4 < 1$  的较小的区域内, 尤其是密度因子变动范围较小。以上情况说明, 两因子合理配比范围虽然较大, 但要达到经济最佳, 必须严格控制密度因子。在一定密度范围内增施氮肥, 可显著地增产增收。经济最佳措施配比点在高氮高密度区: 纯氮 10.9kg/亩, 密度 2477 株/亩, 亩产马铃薯 1074.6kg。

图 8 的磷因子与密度因子的合理配比区, 主要分布在  $X_2 < 0$  的低磷区域, 经济最佳配比线主要在  $1.25 < X_4 < 1.42$  和  $-2 < X_2 < -0.57$  区域内, 即低磷高密度区域。与图 7 相似, 密度因子变动范围较小, 属严格控制的因子。经济最佳措施配比点为施磷 1.8kg/亩、密度 2657 株/亩, 亩产马铃薯 1039.3kg/亩。

综合以上第一类子模型的解析, 得到以下结果: 氮肥与磷肥或密度的经济最佳配比范围较大, 但要获得高产, 氮因子必需在  $0 < X_1 < 2$  之间, 即亩施纯氮 8—16kg; 磷与氮肥或密度的经济最佳配比主要在  $X_2 < 0$  区间, 即亩施磷小于 6 kg; 密度与氮或磷的经济最佳配比范围较小, 主要在  $0.5 < X_4 < 1.4$  区间, 即密度应根据不同的施肥量控制在每亩 2250—2700 株之间。

4. 模型的模拟选优。用模型 (1) 由计算机模拟预测所设计的因子水平, 全部实施

方案 ( $5^4=625$ 个组合) 的产量结果, 亩产量 $\geq 1000\text{kg}$ 的组合有217个, 占34.7%, 亩产 $\geq 1250\text{kg}$ 的组合有61个, 占9.8%; 亩产 $\geq 1500\text{kg}$ 的组合14个, 占2.2%。对亩产 $\geq 1000\text{kg}$ 的217个组合中, 各因子水平出现的频率进行统计分析(见表3), 得到新修梯田亩

表3 模拟亩产 $\geq 1000\text{kg}$ 的217个方案的因子水平分析

因 子	$X_1$ (氮)		$X_2$ (磷)		$X_3$ (有机肥)		$X_4$ (密度)	
	频 次	(%)	频 次	(%)	频 次	(%)	频 次	(%)
- 2	20	9.22	42	19.35	24	11.06	4	1.84
- 1	29	13.36	45	20.74	14	6.45	23	10.60
0	43	19.82	50	23.04	26	11.98	54	24.89
1	60	27.65	50	23.04	60	27.65	72	33.18
2	65	29.95	30	13.83	93	42.86	64	29.49
平均 $\bar{x}_i$	0.5576		-0.0876		0.8479		0.7788	
标准差 $Sx_i$	0.0878		0.0902		0.0907		0.0709	
95%置信域	0.3855—0.7297		-0.2644—0.0892		0.6700—1.0258		0.6399—0.9177	
最优配套措施	9.54—10.92		5.21—6.27		2670—3026		2320—2459	

产马铃薯 $\geq 1000\text{kg}$ 的高产栽培最优配套措施是: 施纯氮9.5—10.9kg/亩、磷5.2—6.3kg/亩、有机肥2670—3026kg/亩, 播种密度2320—2459株/亩。

同样方法, 分别对亩产 $\geq 1250\text{kg}$ 的61个组合与亩产 $\geq 1500\text{kg}$ 的14个组合的因子水平频率的统计分析, 得到前者的高产措施是施肥量为: 纯氮8.0—10.7kg/亩, 磷2.3—3.8kg/亩, 有机肥为3805—3966kg/亩, 播种密度为2310—2543株/亩; 后者的高产措施的施肥量为: 纯氮8.5—12.7kg/亩、磷0.3—1.9kg/亩、有机肥4000kg/亩, 播种密度为2513—2844株/亩。

比较上述三个高产水平的配套措施可以看出, 在亩产1000kg水平基础上, 欲提高产量水平所采取的配套措施是: 维持较高的施氮量, 减少施磷量, 增施有机肥, 同时提高播种密度。

另外, 用极值求解法, 求得最高产量及其因子组合为 $\hat{y}_{\max}=1610.3\text{kg/亩}$ ,  $x_1=0.6$  (N10.4kg/亩),  $x_2=-2$  (不施磷),  $x_3=2$  (有机肥4000kg/亩), 及 $x_4=1.5$  (播种密度2750株/亩); 经济最佳产量及其因子组合为 $\hat{y}_{\text{opt}}=1597.3\text{kg/亩}$ ,  $x_1=-0.2$  (纯氮7.2kg/亩),  $x_2=-2$  (不施磷),  $x_3=2$  (有机肥为4000kg/亩),  $x_4=1.4$  (播种密度2700株/亩)。

### 三、小 结

1. 本研究采用回归的正交旋转组合设计, 建立了适宜的新修梯田培肥增产配套措施的数学模型。研究表明, 在新修梯田生黄土条件下, 种植马铃薯并采取相应的配套措施, 可以获得每亩薯块1000—1600kg的高产, 实现当年受益的同时又培肥土壤。

2. 对本模型的分析结果表明, 试验所选的四个因子中, 氮肥、磷肥与密度等三个因子与马铃薯产量的关系, 符合报酬递减律, 而有机肥因子与马铃薯产量的关系呈报酬递增型。各个因子对产量的效应大小依次为: 密度 > 有机肥 > 氮肥 > 磷肥。一般地, 在生产中欲获马铃薯高产, 配套措施的较优组合是: 施纯氮 8—12kg/亩, 施磷 < 6kg/亩、施有机肥 2600—4000kg/亩, 播种密度 2300—2800株/亩。其中密度的变动范围较小, 需严格控制的一个因子。经济最佳配套措施是: 施纯氮 7.2kg/亩, 施有机肥 4000kg/亩, 不施磷肥, 播种密度 2700株/亩, 可获得经济最佳产量 1597kg/亩。

3. 在生土条件下, 有机肥与马铃薯产量呈报酬递增关系。这是由黄土高原的气候条件与黄土的本质特性所决定的。这进一步证明了, 有机肥在培肥土壤, 提高地力的重要作用, 所以在生产中应给予充分的重视, 尽可能地多施有机肥。由于有机肥用量与产量的报酬递增关系, 决定了有机肥施用量无上限; 而其它因子, 在不同条件下都有相应的适宜量, 过量则造成减产或经济上不合算。因此, 本模型在应用时, 可先根据有机肥的用量, 求其它措施的配比量, 然后预测产量; 或根据预期产量先确定有机肥用量, 再计算其它措施的配比量。提高产量的潜力在于采取以施有机肥为中心, 调整其它配套因子的措施。

(作者工作单位: 山西大学黄土高原地理研究所)

#### 参 考 文 献

- [1] 省兵等:《农业多因素试验设计与统计分析》, 湖南科学技术出版社, 1985年。
- [2] 陈伦寿等:《农田施肥原理与实践》, 农业出版社, 1984年。

## A Study on Comprehensive Measure Model of Increasing Land Fertility and Yield on New Terraced Fields

Duan Jiannan    Li Shuanhuai    Wang Gailan    Zhang Jinfeng

#### Abstract

This field experiment of orthogonal rotation combination design was carried out at Zhuanyaogou basin experimental area of Hequ county in northwestern Shanxi. Based on experimental results, a comprehensive measure mathematical model of increasing soil fertility and yield on new terraced fields was established. On the analysis and optimization of model, it can be found that the better comprehensive measures of planting potato on new terraced fields are that: nitrogen fertilizer (N) is 8-12kg/mu, phosphate fertilizer ( $P_2O_5$ ) less than 6kg/mu, organic fertilizer 2600-4000kg/mu and planting density 2300-2800 plants/mu, thus potato yield can reach 1000-1600kg/mu.