

# 中型农业生态工程的数学模型

卞有生<sup>1</sup>, 刘来福<sup>2</sup>, 徐汝梅<sup>2</sup>

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 北京师范大学, 北京 100875)

**[摘要]** 文章以北京大兴县留民营村为例, 建立了中型(村庄级)农业生态工程的数学模型, 该模型为分室模型, 由8个分室组成, 文中给出了各个分室的状态变量及控制变量, 建立了各分室的数学模型, 并应用该数学模型指导了留民营的实际生产建设, 取得了良好结果。

**[关键词]** 农业生态工程; 数学模型; 状态变量; 控制变量

农业生态工程特别是大、中型工程的数学模型的建立是十分困难的<sup>[1]</sup>, 要使模型有效, 必须模拟实际系统, 至少在某种有效的范围内, 包括重要的变量, 用数学表达。而一个中型(村庄级)农业生态工程系统的变量, 至少需要200多个。而系统的最优化问题则更为困难。本文以北京大兴县留民营村(见封底)为例, 在系统、深入分析其结构的基础上<sup>[2]</sup>, 建立了系统的分室模型, 并应用计算机对系统的动态进行了模拟和研究, 以达到对系统进行深入、定量研究之目的。

## 1 留民营生态系统的结构和系统变量

留民营作为一个生态系统, 在构造它的数学模型时, 主要考虑了以作物为主的初级生产者子系统, 以畜禽饲养为主的初级消费者子系统和把动物粪便和农业秸秆转化为肥料的分解者子系统。一个生态农业系统是一种典型的人工生态系统, 人对整个系统的控制以及由此而引起的系统反馈作用是必须考虑在内的, 因此在系统模型中又加入了人口子系统。饲料和粮食加工也做为一个子系统加入模型。沼气池作为一个分室归入分解者子系统。化肥的使用是农业生产中一个不可忽视的重要因素, 它

作为一个分室列入生产者子系统。

农业生态系统也是个控制、反馈系统, 在模型中, 对系统的控制将由一些控制变量来实现, 系统的某些反馈作用将通过一些系统变量的阈值给出。

为研究和叙述的方便, 把某些子系统中功能类似的成分合并成若干分室, 其余的子系统分别作为单个的分室而构成一个分室系统模型。在生产者子系统中把作物、蔬菜、水果与化肥分开成为作物、化肥两个分室。在初级消费者子系统中, 由于渔塘作为一个水生生态系统和陆地生态系统有很大的不同, 它本身就是一个完整的生态系统。但本研究中把它做为黑箱处理, 关心的只是它的输入和输出, 因此在模型中也把它作为初级消费者子系统的分室。其它畜禽构成畜禽分室。分解者子系统将分为沼气和粪肥两个分室。连同人口和加工两个分室, 本模型将是一个包括八个分室的分室系统模型。分别用  $X^{(i)}$  表示作物、化肥、畜禽、渔业、沼气、粪肥、人口和加工分室, 其中  $i=1, 2, 3, 4, \dots, 8$ 。

在各个分室中, 考虑了如下的系统状态变量:

作物分室: 包括水稻、小麦、大麦、青贮作物、棉花、蔬菜、油菜、果木及蘑菇等9种作物。主要考虑其经济产量(粮、棉、菜、果等)、秸秆

和其它产量(稻糠、棉籽等)。并依次用 $X_{ci}^{(1)}(t)$ ,  $X_{si}^{(1)}(t)$ ,  $X_{oi}^{(1)}(t)$ , 表示上述作物在时间 $t$ 时的经济、秸秆及其它产量, 其中,  $i=1, 2, \dots, 9$ 。  $X_1^{(1)}(t)$  为一般种植条件下所需的劳动力数量。

化肥分室: 只考虑农田的化肥施用量。

畜禽分室: 包括奶牛、菜牛、猪、马、鸡、鸭和填鸭等7种饲养畜禽, 其中除填鸭考虑为1年的饲养之外, 其它畜禽均包括它们不同的年龄组。考虑其存栏数(包括年龄结构), 蛋、奶、肉的产量及排粪量, 以及它们所需要的各种饲料: 粮食(玉米、高粱、大麦等), 秸秆(稻草、青饲料等)及其他(稻糠、麦麸)等, 依次用 $X_{Ai}^{(3)}(at)$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ )表示时间 $t$ , 年龄组 $a$ 的上述畜禽的存栏数; 用 $X_{ei}^{(3)}(t)$ ,  $X_{mi}^{(3)}(t)$ ,  $X_{di}^{(3)}(t)$ 表示时间 $t$ 上述畜禽的蛋、奶产量, 出肉量和排粪量, 其中,  $i=1, 2, \dots, 7$ ; 用 $X_{fci}^{(3)}(t)$ ,  $X_{fsi}^{(3)}(t)$ ,  $X_{foi}^{(3)}(t)$ 表示上述畜禽在时间 $t$ 对粮食、秸秆和其他饲料的需求量, 其中 $i=1, 2, \dots, 7$ 。  $X_1^{(3)}(t)$ 为精养条件下所需劳动力数。

渔业分室: 将只考虑一年饲养的鱼类, 并假定单位渔塘面积放养鱼苗数是固定的, 将考虑产鱼量 $X_f^{(4)}(t)$ 和饲料的需要量 $X_c^{(4)}(t)$ 。

沼气分室: 包括沼气池所需要的马粪 $X_{md}^{(5)}(t)$ , 秸秆 $X_{ms}^{(5)}(t)$ , 以及产出的沼气 $X_g^{(5)}(t)$ , 沼气肥 $X_r^{(5)}(t)$ 。这里假设人粪将全部供给沼气池使用。

粪肥分室: 将考虑由剩余的秸秆和畜禽粪经沤制准备作为有机肥料而返回田间的数量 $X_d^{(6)}(t)$ 。

人口分室: 用 $X_p^{(7)}(a \cdot t)$ 表示时间 $t$ 年龄为 $a$ 的人口数,  $X_1^{(7)}(t)$ 表示劳动力数,  $X_{pc}^{(7)}(t)$ ,  $X_{ec}^{(7)}(t)$ 分别表示人口对粮食和牛奶的需求。

加工分室: 用 $X_o^{(8)}(t)$ 和 $X_i^{(8)}(t)$ 表示 $t$ 时间加工业所需的原料和生产加工的饲料及食品。

控制变量: 系统中所考虑的控制变量有: 作物、蔬菜的种植计划, 用 $Y_i^{(1)}(t)$ ,  $i=1, 2, \dots, 9$ 依次表示前述作物在时间 $t$ 的种植面积; 化肥使用计划 $Y_i^{(2)}(t)$ ,  $i=1, 2, \dots, 9$ , 依次表示各作物 $t$ 时间每亩的化肥施用量; 畜禽养殖计划(指购买, 不包括自然繁殖), 用 $Y_i^{(3)}(a \cdot t)$ ,  $i=1, 2, \dots, 7$ 依次表示 $t$ 时间购买的年龄 $a$ 的上述畜禽的数量; 养鱼计划,  $Y^{(4)}(t)$ 表示 $t$ 时间的渔塘总面积; 沼气发展计划, 用 $Y_n^{(5)}(t)$ ,  $Y_d^{(5)}(t)$ ,  $Y_s^{(5)}(t)$ ,  $Y_g^{(5)}(t)$ ,  $Y_h^{(5)}(t)$ 分

别表示 $t$ 时间新建的沼气池的数量, 每个池所需的粪、秸秆以及产生的沼气和沼气肥(沼气水和沼气渣)的数量; 劳动力安排计划,  $Y_1^{(7)}(t)$ ,  $Y_3^{(7)}(t)$ ,  $Y_4^{(7)}(t)$ ,  $Y_8^{(7)}(t)$ 分别表示作物、畜牧、养鱼和加工分室所分配的劳动力。

## 2 系统模型的分室流程、基本假设及时滞效应

系统模型各分室之间的流程如图1所示。鉴于某些分室内的状态变量较多, 为便于对整个系统工作状态、工作原理的理解, 只给出了以分室为单位的流程。某些分室内部的动态将在数学模型一节中具体给出。计算机的模拟工作是依据实际模型得到的。

模型是在如下的基本假设下进行工作的:

1) 作物分室将为人口分室提供足够的粮菜和其他农副产品;

2) 由于养鱼业所需的劳动力及饲料不多, 故假定系统的人口分室及其他分室可为渔业提供充足的劳力及饲料;

3) 沼气池所产出的沼气渣、沼气水等肥料, 在供给鱼类需要后的剩余部分, 全部用于作物分室;

4) 作物秸秆中可用部分, 除充分供给畜牧分室作饲料以外, 其余部分全部供给沼气池和制造有机肥料使用。

由于农业生产周期是以年为单位的, 故系统模型在工作时, “时滞”的作用必须考虑在内。在上述的假设下, 系统模型中“时滞”效应如下:

1) “去年”作物分室的收获为“今年”的人口提供粮菜和为“今年”的畜禽提供饲料;

2) “去年”作物分室收获的秸秆为“今年”的沼气提供原料, 并且为今年作物栽培提供有机肥料;

3) “今年”的畜禽粪肥为“今年”的沼气提供原料并为“明年”的作物提供有机肥料;

4) “今年”的沼气渣、沼气水为“今年”的作物栽培提供肥料;

5) “今年”的人口分室为“今年”的各有关分室提供劳动力。



$$Z^{(5)}(t) = X_r^{(5)}(t) + X_w^{(5)}(t) - X_{lm}^4(t).$$

用 $[Z_*^{(5)}, Z_{**}^{(5)}]$ 表示沼气肥在大田中的中等使用量, 则当 $Z^{(5)}(t) > Z_*^{(5)}$ 时, 大田呈高肥状态,  $Z^{(5)}(t) < Z_*^{(5)}$ 时, 为低肥状态。以此影响作物分室的生产模式。

$Z^{(6)}(t)$ ——准备用于作物分室的有机肥总量

$$Z^{(6)}(t) = X_d^{(6)}(t),$$

要求 $Z^{(6)}(t) \geq Z_*^{(6)}$ ,  $Z_*^{(6)}$ 为作物分室有机肥的最低施用量, 在我们的假设下,  $Z^{(6)}(t) < Z_*^{(6)}$ , 则意味着沼气分室占用了过多的有机肥料, 则必须对沼气池修建的规模 $Y^{(5)}(t)$ 进行调整。否则作物分室将处于缺乏有机基肥的状况下进行工作, 这是不可取的, 只有令模型停止工作。

$Z^{(7)}(t)$ ——系统中所需的劳动力总数

$$Z^{(7)}(t) = X_1^{(1)}(t) + X_1^{(3)}(t) + X_1^{(8)}(t).$$

要求 $Z^{(7)}(t) \geq Z_*^{(7)}(t)$ ,  $Z_*^{(7)}$ 为 $t$ 时间人口分室所提供的劳动力总数。 $Z_*^{(7)}(t) = \int_{a_1}^{a_2} X_p^{(7)}(a, t) da$  当 $Z^{(7)}(t) > Z_*^{(7)}(t)$ 时, 表示系统发展规模过大, 系统本身不能提供足够的劳动力, 这时可以通过作物分室, 畜禽分室的控制变量进行调整, 或者通过劳动力的重新分配安排, 改变有关分室的工作模式来实现。

### 4 分室系统的数学模型

这里我们给出各分室状态变量变化的数学模型。

#### 4.1 作物分室和化肥分室

由于作物一般是一年收获一次, 因此把时间 $t$ 取为以年为单位的离散变量是合适的。故我们在这里取:

$t = K, K = 1, 2, \dots$ 。一般说来, 第 $i$ 种作物的经济产量 $X_{ci}^{(1)}(K)$ 将由如下的模型来描述。

$X_{ci}^{(1)}(K) = Y_i^{(1)}(K) P_{ci}^{(1)}(Y_i^{(2)}(K)), Y_i^{(2)}(K - 1), Y_{Ri}^{(5)}(K) Y_1^{(7)}(K)$ 其中 $P_{ci}$ 为第 $i$ 种作物单位面积的经济产量, 它是化肥、沼气肥和大田劳动力的函数。如上节所讨论的, 依投入大田劳动力数量的多少 $P_{ci}$ 将取粗放种植、一般种植、精耕细作三种模式; 依赖于沼气的多少,  $P_{ci}$ 将有高肥、中肥和低肥三种生长模式; 对于化肥的依赖将随着当年化肥的施用量而增加, 还注意到了由于化肥的施用所造成的土地板结的影响, 将由前一年化肥的施用量产生一个负反馈效应。

关于秸秆和其它产量 $X_{si}^{(1)}(K), X_{oi}^{(1)}(K)$ 也与此类似。

#### 4.2 畜禽分室

由于各种畜禽的自然增殖及肉、蛋、奶的产量和排粪量是随着时间与畜禽年龄的变化在一年内连续发生的, 所以在建立模型时, 首先应把年龄 $a$ 及时间 $t$ 理解为连续的变量。

用 $P_i(r, t)$ 表示 $t$ 时间年龄为 $r$ 的第 $i$ 种畜禽的种群密度, 则时间 $t, a$ 岁(满 $a$ 周岁但不足 $a+1$ 周岁)的该种畜禽总数应用积分 $\int_a^{a+1} P_i(r, t) dr$ 给出, 对于时间区间 $[t_0, t_1]$ 及 $t_*[t_0, t_1]$ , 系统中的畜禽将由两部分构成: 一为 $t_0$ 时刻就是系统中存栏的畜禽, 用 $P_i^*(r, t)$ 表示其密度, 另一部分为在任一 $t_*$ 时刻购买的, 密度为 $P_i^{**}(r, t)$ , 显然应有 $t \in [t_0, t_1]$ 。如果令 $P_i^{**}(r, t) = 0, t \in [t_0, t_1]$ , 则有

$$P_i(r, t) = P_i^*(r, t) + P_i^{**}(r, t).$$

于是时间 $t, a$ 岁的第 $i$ 种畜禽的存栏数应为

$$X_{Ai}^{(3)}(a, t) = \int_a^{a+1} P_i(r, t) dt.$$

设 $\mu_i(r), f_i(r)$ 分别为 $r$ 岁的第 $i$ 种畜禽的死亡率和生育力(需要指出, 这里 $\mu_i(r)$ 并不只是畜禽的自然死亡率, 它包括了作为肉类生产而屠宰或出售的比率), 关于不同畜禽的增殖(包括繁殖和购买)有如下的模型:

##### 4.2.1 奶牛、菜牛

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1^*}{\partial r} + \frac{\partial P_1^*}{\partial t} = -\mu_1(r)P_1^*(r, t), \\ \frac{\partial P_2^*}{\partial r} + \frac{\partial P_2^*}{\partial t} = -\mu_2(r)P_2^*(r, t), \\ t_0 \leq t \leq t_1; \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_1^*(0, t) = P_1 \int_0^\infty f_1(r)P_1^*(r, t) dr, \\ P_2^*(0, t) = \int_0^\infty [f_2(r)P_2^*(r, t) + q_1 f_1(r)P_1^*(r, t) dr], \\ P_1^*(r, t_0) = P_{10}^*(r), P_2^*(r, t_0) = P_{20}^*(r). \end{cases}$$

其中 $P_1$ 为奶牛所生的雌性小牛的比例,  $q_1 = 1 - P_1, P_{10}^*(r), P_{20}^*(r)$ 为 $t_0$ 时刻的存栏密度。

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1^{**}}{\partial r} + \frac{\partial P_1^{**}}{\partial t} = -\mu_1(r)P_1^{**}(r, t), \\ \frac{\partial P_2^{**}}{\partial r} + \frac{\partial P_2^{**}}{\partial t} = -\mu_2(r)P_2^{**}(r, t), \\ t_* \leq t \leq t_1; \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_1^{**}(0, t) = P_1 \int_0^\infty f_1(r) P_1^{**}(r, t) dr, \\ P_2^{**}(0, t) = \int_0^\infty [f_2(r) P_2^{**}(r, t) + \\ q_1 f_1(r) P_1^{**}(r, t)] dr, \\ P_1^{**}(r, t_*) = P_{10}^{**}(r), P_2^{**}(r, t_*) = P_{20}^{**}(r). \end{cases}$$

其中,  $P_{10}^{**}(r), P_{20}^{**}(r, t_*)$  为  $t_*$  时刻购买的种群密度。

4.2.2 其他畜禽 ( $i=3, 4, \dots, 7$ ) 有如下的模型:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i^*}{\partial r} + \frac{\partial P_i^*}{\partial t} &= -\mu_1(r) P_i^*(r, t), \\ P_i^*(0, t) &= P_i \int_0^\infty f_i(r) P_i^*(r, t) dr, \\ P_i^*(r, t_0) &= P_{i0}^*(r), \\ t_0 &\leq t \leq t_1; \\ \frac{\partial P_i^{**}}{\partial r} + \frac{\partial P_i^{**}}{\partial t} &= -\mu_1(r) P_i^{**}(r, t), \\ P_i^{**}(0, t) &= P_i \int_0^\infty f_i(r) P_i^{**}(r, t) dr, \\ P_i^{**}(r, t_0) &= P_{i0}^{**}(r), \\ t_* &\leq t \leq t_1. \end{aligned}$$

当畜禽饲养呈拥挤状态时, 对畜禽增殖参数的影响将通过  $\mu_i(r)$  及  $f_i(r)$  的变化而实现。

用  $X_{Eio}^{(3)}[a, Y_3^{(7)}(t), Y_{Eci}^{(3)}(t)], X_{Eio}^{(3)}[a, Y_3^{(7)}(t), Y_{Eci}^{(3)}(t)], X_{uio}^{(3)}[a, Y_3^{(7)}(t), Y_{Fci}^{(3)}(t)], X_{Dio}^{(3)}[a, Y_3^{(7)}(t), Y_{Fci}^{(3)}(t)]$  分别表示  $t$  时间第  $i$  种畜禽每一  $a$  岁的个体的蛋(或奶)、肉的产量及排粪量。它们都是年龄  $a$ 、劳动力数  $X_L^{(7)}(t)$  和粮食饲料量  $Y_{Fci}^{(3)}(t)$  的函数。于是不同畜禽的蛋、奶、肉及粪的输出量将有如下的模型:

$$\begin{aligned} X_{Ei}^{(3)}(t) &= \int_0^\infty X_{Eio}^{(3)}(r, X_L^{(7)}, Y_{Fci}^{(3)} P_i(r, t) dr, \\ X_{Di}^{(3)}(t) &= \int_0^\infty X_{Dio}^{(3)}(r, X_L^{(7)}, Y_{Fci}^{(3)} P_i(r, t) dr, \\ X_{Mi}^{(3)}(t) &= \int_0^\infty X_{Mio}^{(3)}(r, X_L^{(7)}, Y_{Fci}^{(3)} P_i(r, t) dr. \end{aligned}$$

用  $X_{Fci}^{(3)}(a, t)$  表示  $t$  时间, 第  $i$  种畜禽每一  $a$  岁的个体正常情况下所需的粮食饲料量, 则不同畜禽对粮食饲料的需要量将有如下模型:

$$X_{Fci}^{(3)}(t) = \int_0^\infty X_{Fcio}^{(3)}(r, t) P_i(r, t) dr.$$

具体应用时将上述连续模型离散化为以年为时间单位的离散模型, 于是上述模型将成为一个矩阵

模型。

### 4.3 渔业分室

假定鱼类也是一年收获一次, 类似于作物分室, 则对于渔业产量  $X_F^{(4)}(K)$  和饲料需要量  $X_{FF}^{(4)}(K)$  有如下的模型:

$$\begin{aligned} X_F^{(4)}(K) &= Y^{(4)}(K) P_F^{(4)} [Y_R^{(5)}(K), Y_4^{(7)}(K)], \\ X_{FF}^{(4)}(K) &= Y^{(4)}(K) F_F^{(4)}. \end{aligned}$$

这里  $P_F^{(4)}$  和  $F_F^{(4)}$  分别是单位渔塘面积的产鱼量和饲料的需要量, 前者可以理解为沼气肥使用量和渔业劳动力的函数。

### 4.4 沼气分室和粪肥分室

关于沼气有如下的模型:

$$\begin{aligned} X_G^{(5)}(K) &= X_G^{(5)}(K-1) + \sum Y_N^{(5)}(K) \times Y_G^{(5)}(K), \\ X_R^{(5)}(K) &= X_R^{(5)}(K-1) + \sum Y_N^{(5)}(K) \times Y_R^{(5)}(K), \\ X_D^{(5)}(K) &= X_D^{(5)}(K-1) + \sum Y_N^{(5)}(K) \times Y_D^{(5)}(K), \\ X_S^{(5)}(K) &= X_S^{(5)}(K-1) + \sum Y_N^{(5)}(K) \times Y_S^{(5)}(K), \end{aligned}$$

关于粪肥则有

$$\begin{aligned} X_D^{(6)}(K) &= X_S^{(1)}(K-1) + X_D^{(3)}(K) - \\ &X_S^{(5)}(K) - X_D^{(5)}(K) - X_D^{(3)}(K). \end{aligned}$$

其中  $X_S^{(1)}$  为作物分室中所提供的能用于沤制有机肥的秸秆,  $X_D^{(3)}$  为畜禽分室中提供做为肥料的畜禽粪。

### 4.5 人口分室

类似于畜禽分室, 人口分室也是一个连续模型, 令  $P_i(r, t)$  为人口种群的密度函数, 则有:

$$\frac{\partial P_1}{\partial r} + \frac{\partial P_1}{\partial t} = -\mu(r) P_1(r, t),$$

$$P_1(0, t) = \int_0^\infty f_1(r) P_1(r, t) dr,$$

$$P_1(r, t_0) = P_{10}(r).$$

人口分室于时间  $t$  提供的劳动力总数为

$$X_L^{(7)}(t) = \int_{a_1}^{a_2} P_1(r, t) dr.$$

$a_1, a_2$  为劳动的上下年龄限, 应用中将以年为时间单位把上述模型离散化为矩阵模型, 为避免计算过程不必要的冗长, 在年龄上以 5 年为计算单位, 将人口分成若干个 5 年的年龄组。

### 4.6 加工分室

对于加工分室有如下的模型:

$$X_C^{(8)}(K) = X_{Co}^{(8)} Y_8^{(7)}(K),$$

$$X_F^{(8)}(K) = X_{Fo}^{(8)} Y_C^{(8)}(K).$$

式中  $X_{Co}^{(8)}$  和  $X_{Fo}^{(8)}$  分别表示一个劳动力所能加工的

原料量以及单位原料所生产的加工饲料和食品量。

## 5 模型的指标

衡量系统模型的指标,除考虑有关分室的物质产量以及商品粮和供输出的肉、蛋、奶和鱼的产量之外,作为一个生产农业系统,还把能量转换效率、光能利用率、人工辅助能产投比、有关次级生产的饲料转化率、组织生长效率和呼吸效率做为衡量模型的指标。在运行此模型时,与物质生产量一

起同时给出相应生态指标的数值,以利于对模型的结果进行更深入的分析研究。

数学模型的计算机程序及计算机模拟结果略。

### 参考文献

- [1] 牛文元编著.农业自然条件分析[M].北京:农业出版社,1981,282
- [2] 卞有生,徐汝梅.留民营生态农业系统的结构与能量流和生态效率的计算[J].环境科学,1986,7(5):94

# The Mathematic Model of Medium-sized Agro-ecological Engineering

Bian Yousheng<sup>1</sup>, Liu Laifu<sup>2</sup>, Xu Rumei<sup>2</sup>

(1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037 China;

2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

[Abstract] Mathematic model of agricultural eco-engineering is to represent the knowledge of system's present situation, function and structure. Based on study and analysis, a mathematic model of medium-sized agro-ecological engineering—Luiminying ecological agro-system is established. This system consists of eight branch rooms. The state variables and the control variables for each branch room are given and the mathematical models for the branch rooms are also built. The mathematical model has been applied to guiding the practical production in Luiminying Village and satisfactory results are achieved.

[Key words] mathematic model; agro-ecological engineering; state variables; control variables

## 磁控溅射法制备硅纳米线

硅是半导体材料领域应用最广泛的材料,有着成熟的加工工艺,是半导体集成电路的基础材料。近年来硅材料的一维结构(硅纳米线)因其特殊的性质已引起人们极大的兴趣。同时硅纳米线保持了块状硅材料的物理、化学特性,可以掺杂为 n 型或 p 型,是基础纳米器件理想的材料。

目前制备硅纳米线的方法很多,如模板法、化学气相沉积法、物理蒸发法等。笔者实验采用射频磁控溅射法,背景真空度为  $5 \times 10^{-4}$  Pa,溅射气体为高纯 Ar,溅射压强为 1.5 Pa,衬底温度为室温。在衬底  $\langle 111 \rangle$  Si 片上溅射 150 nm 的金属 Mo。溅射结束后,将衬底置于石英舟中,放在管式电炉中加热。加热时间为 3 h,加热温度为 1150 ℃,H<sub>2</sub> 作载气,气体流量为 300 mL/min。

用傅里叶红外透射谱(FTIR),X 射线衍射(XRD),X 光电子能谱(XPS)对薄膜样品进行了结构和组分分析,并用扫描电镜(SEM)对薄膜进行了形貌分析。分析表明退火后生成了硅纳米线。

采用金属 Mo 作为催化剂,在衬底  $\langle 111 \rangle$  Si 片上制备出了硅纳米线。其生长机理可以用固-液-固(SLS)生长机制来解释。

(山东师范大学/山东大学 庄惠照 安霞 杨莺歌等)