

烤房内干烟叶的回潮特性及其动力学模型研究

张保全¹, 耿宗泽², 崔庆伟¹, 杨杰², 陈小翔¹, 段旺军², 李志伟², 路晓崇^{3*}

(1. 浙江中烟工业有限责任公司, 浙江 杭州 310004; 2. 四川中烟工业有限责任公司, 四川 成都 610021;

3. 河南农业大学 烟草学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为了研究不同条件下烟叶的回潮规律, 对烤烟的回潮特性进行分析, 并构建烤烟回潮的动力学模型. 结果表明, 在环境相对湿度为 65% 条件下, 烤烟回潮过程中烟叶的含水率呈对数增长趋势, 且各处理均能达到回潮效果, 但 45 °C 与 55 °C 回潮效率较高; Page 模型是烟叶回潮动力学模型的适宜模型, 而且各处理的拟合参数不同, 但均达到 P 值 ≤ 0.0001 的极显著水平, 其中烟叶回潮的动力学模型为 $MR = \exp[(1.96558 - 0.1188 \times T + 0.00117 \times T^2) \times t^{1.85215 - 0.0113 \times T}]$. 因此, 生产过程中可利用烟叶回潮模型对烟叶的回潮效果进行精准控制.

关键词: 烤烟; 初烤干烟叶; 回潮特性; 动力学模型

中图分类号: S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5639(2017)03-0016-05

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2017.03.005

Features of Moisture Regain of Dry Tobacco Leaves in Curing Barn and Its Dynamics Model Study

ZHANG Baoquan¹, GEGN Zongze², CUI Qingwei², YANG Jie², CHEN Xiaoxiang¹, DUAN Wangjun², LI Zhiwei², LU Xiaochong^{3*}

(1. China Tobacco Zhejiang Industrial Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang, China 310004;

2. China Tobacco Sichuan Industrial Co., Ltd, Chengdu, Sichuan, China 610021;

3. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China 450002)

Abstract: In order to study the rule of moisture regain of tobacco leaves under the different conditions, its features analyzed and its dynamic model was built. The results showed when the condition of relative humidity was 65%, the moisture content of flue-cured tobacco had the trend of logarithmic growth and every treatment could get the conditioning effect. However, the temperature between 45 °C and 55 °C the rate of moisture regain was higher. The page drying model was the right model of the conditioning dynamic model of flue-cured tobacco. The fitting parameter of different treatments was different, but all the parameters reached the significant level at $P \leq 0.0001$. The conditioning dynamics model of flue-cured tobacco was $MR = \exp[(1.96558 - 0.1188 \times T + 0.00117 \times T^2) \times t^{1.85215 - 0.0113 \times T}]$. So in the producing process, tobacco leaves moisture regain model could be used to accurately control the moisture regain effect.

Key words: flue-cured; tobacco after-cured; moisture characteristics; dynamic model

烟叶的回潮是一个与周围空气的水分平衡过程, 烟叶含水量与周围空气含水量的水分梯度越大, 回潮效率越高^[1-3], 其不仅影响烟叶的生产效率而且对烟叶质量的形成也有一定的影响^[4-6]. 对于烟叶的回潮, 卷烟的生产过程中已有大量的研究, 张宗盛等^[6-10]对制丝加工过程中烟叶回潮特性以及烟叶质量进行了研究, 结果表

明, 回潮方式对烟叶吸湿速率以及感官质量有较大影响. 曹洁穹等^[11-14]对加工过程中松散回潮进行了一系列研究, 结果表明, 回潮的环境参数对烟叶质量有较大的影响. 同时回潮也是烘烤过程中的一项重要环节^[15-16], 其效率的高低对烟叶烘烤周期以及烟农的经济收益有着重要影响^[17], 尤其是在外界天气持续干燥少雨以及烘

收稿日期: 2016-12-24

基金项目: 浙江中烟工业有限责任公司资助项目(2015330000341167).

作者简介: 张保全(1966—), 男, 河南驻马店人, 高级农艺师, 硕士, 主要从事烟草原料技术体系研究.

* 通讯作者: 路晓崇(1988—), 男, 河南漯河人, 在读硕士, 主要从事数据挖掘与烟叶调制研究, E-mail: ruciyubici@163.com.

烤旺季烤房数量不足的情况下表现得更加明显^[18-20]。由于烤烟的烘烤均在广大农村地区进行,工业化程度较低且回潮设备相对落后^[17],再者,回潮对象具有密度大,含水量低等特点^[19],使得对初烤烟叶进行回潮的局限性相对较大。谢已书等^[21]针对烤后烟回潮难的问题利用研制回潮机对烤后烟叶进行回潮,结果表明,密集烤房烤后烟叶加湿回潮适宜温度为 50 ~ 55 ℃。由于水分动力学是研究农作物回潮干燥特性的重要手段,因此国内外学者通过一些水分动力学干燥模型对农作物干燥过程水分含量变化进行试验研究^[22-25],并取得了重要成果。然而,目前对于烤烟回潮过程中的回潮特性动力学模型研究却鲜见报道,基于此,本研究重点研究烤烟烘烤调制结束后、下炕前干烟叶在不同温度条件下的回潮特性,探索回潮温度对其回潮速率的影响规律,建立回潮动力学模型,寻找烤烟低耗高效的回潮方法,旨在为研发新型的生产回潮设备提供可能的途径和设计基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年在四川省广元市普安镇剑平烘烤工场进行。供试烤房为气流上升式热泵烟夹烤房与散叶插签烤房,供试品种为 K326。所用回潮机由郑州格润加湿器配件销售有限公司生产,所用干燥箱由上海精宏公司生产,试验所用天平为上海卓精 1/1000 BSM 电子分析天平。

1.2 试验设计

试验选取 4 座运行正常、保温保湿性能好的烟夹烤房,设置以下 4 个处理:

- T1: 停火后干球温度降至 65 ℃ 时开始回潮;
- T2: 停火后干球温度降至 55 ℃ 时开始回潮;
- T3: 停火后干球温度降至 45 ℃ 时开始回潮;
- T4: 停火后干球温度降至 35 ℃ 时开始回潮。

试验过程中始终保持烤房内的相对湿度为 65%, 然后选取烟夹烤房与散叶插签烟叶烤房各 1 座,在停火后干球温度降至 50 ℃ 时进行回潮,在同样湿度条件下进行模型的验证。

1.3 水分测定

湿基含水率运用烘箱干燥法进行,试验过程中每隔 15 min 取一次样,每次取 60 片用分析天平测定烟

叶质量,之后于干燥箱内 85 ℃ 烘干之后再测定一次烟叶质量,计算烟叶的湿基含水率,计算公式如下:

$$W = (w_1 - w_2) / w_1 \times 100\%$$

式中 W 为烟叶含水率,单位:%; w_1 为烘干前样品质量,单位:g; w_2 为烘干后烟叶样品质量,单位:g。

烟叶的吸湿回潮速率为:

$$v_i = (W_i - W_0) / t,$$

式中 v_i 为 i 时刻烟叶的回潮速率,单位:%/h; W_i 为 i 时刻烟叶的含水率,单位:%; W_0 为开始回潮时烟叶的含水率,单位:%; t 为回潮时间,单位:h。

烟叶的水分比用以下公式计算:

$$MR = (W_t - W_e) / (W_0 - W_e),$$

式中 MR 为水分比; W_t 为 t 时刻烟叶的含水率,单位:%; W_e 为烟叶样品的平衡含水率,单位:%; W_0 为开始回潮时烟叶的含水率,单位:%。文中以最大含水率为烤烟回潮的平衡含水率。

1.4 回潮温湿度的控制

回潮温度通过热泵进行稳定控制,回潮风机转速为 960 r/min,当烤房内的相对湿度达到 65% 时,回潮机停止工作。

1.5 干燥模型

干燥模型采用 Page 模型与单经验模型^[15]。

1.6 数据处理

数据处理采用 Mathematica 10.0 进行^[26]。

2 结果与分析

2.1 不同处理烤烟的回潮特性

由图 1(a)可知,回潮前期烟叶含水率随回潮时间增加上升较快,回潮后期上升较慢,回潮时间最短的为 45 ℃ 和 55 ℃,而 65 ℃ 的回潮时间最长,但不同处理回潮过程水分的吸收均呈对数规律上升。图 1(b)为烟叶回潮的水分比曲线,从图 1(b)可以看出,前期烟叶回潮的 MR 降低较快,后期较慢,不同处理差异较大的时间出现在回潮的 1.5 ~ 2.5 h 之间,35 ℃ 回潮的烟叶前期 MR 值较大,后期较小,65 ℃ 的烟叶回潮的 MR 值表现为前期较小后期较大,但整个回潮过程烟叶的水分比成指数规律下降。图 1(c)为烟叶的回潮速率曲线,由图 1(c)可知,35 ℃ 的烟叶回潮吸湿速率在整个回潮过程中最小,65 ℃ 烟叶的回潮吸湿速率降低幅度较大,这可能是由于回潮温度过高所致。烟叶的回潮速率分为两个快速阶段与慢速阶段,在回潮初期烟叶的含水量较

低,当烤房内空气湿度增加时,烟叶与空气的水分梯度较大,吸湿速率急速上升.随着回潮的推移,烟叶的水分含量不断增加,二者的水分梯度降低,烟叶的吸湿的动能减少,回潮速率减小.

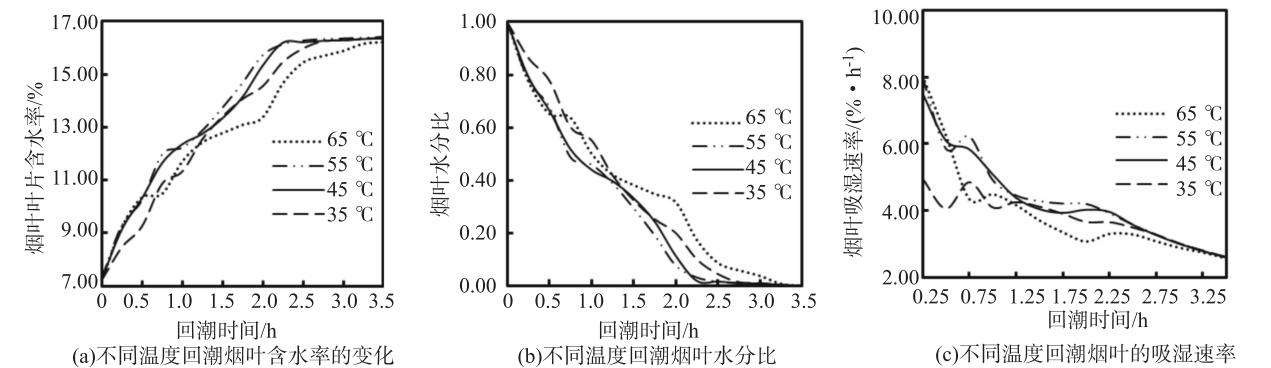


图1 不同处理烤烟的回潮特性

2.2 烤烟回潮的动力学模型

2.2.1 回潮模型的选取

烟叶作为一种多孔介质,薄层材料,其干燥吸湿过程符合热动力学规律,因此选用 Fick 第二定律中普适性较好的 Page 模型与单经验模型,其分别如下:

单经验模型 $MR = a \exp(-K_t)$;

Page 模型 $MR = \exp(-Kt^n)$.

式中: K 和 n 为参数.
将两个模型对数化如下:

单经验模型 $\ln MR = -K_t + \ln a$;

Page 模型 $\ln(-\ln MR) = \ln K + n \ln t$.

将图 1 (b) 中的数据按照两个模型作图,得到图 2 (a) 和图 2 (b).

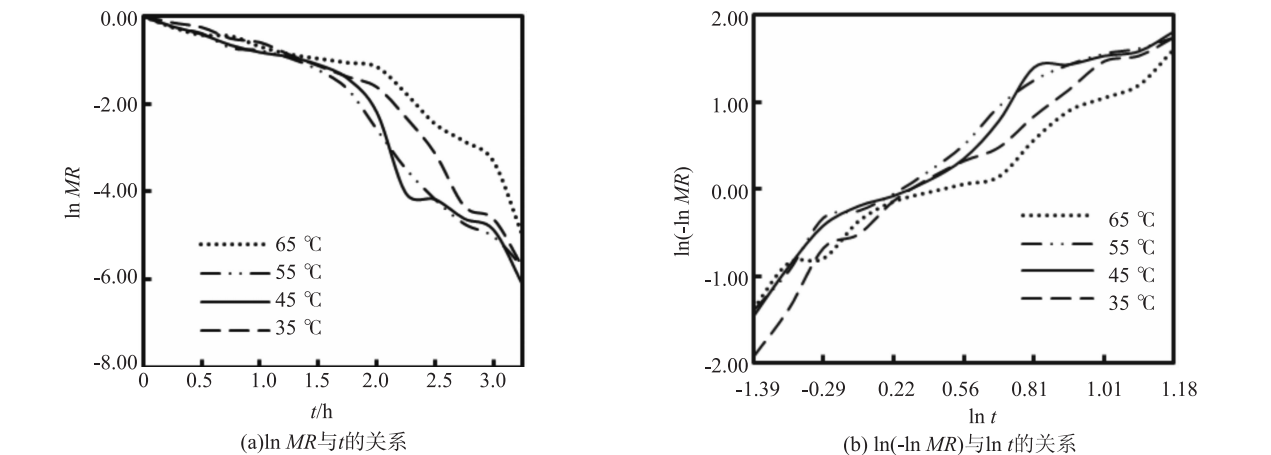


图2 两模型的MR与时间关系

从上图 2 可知,图 2 (b) 的线性更加显著,因此可以选择 Page 模型作为烤烟回潮的动力学模型,利用 Mathematica 10.0 进行拟合,得到不同温度下的烤烟回潮模型及表 1:

$\ln(-\ln MR) = -0.2303 + 1.0913 \ln t, 65\text{ }^{\circ}\text{C};$ (1)
 $\ln(-\ln MR) = 0.0259 + 1.3099 \ln t, 55\text{ }^{\circ}\text{C};$ (2)
 $\ln(-\ln MR) = -0.0015 + 1.3237 \ln t, 45\text{ }^{\circ}\text{C};$ (3)
 $\ln(-\ln MR) = -0.2799 + 1.4577 \ln t, 35\text{ }^{\circ}\text{C}.$ (4)

由表 1 可知,4 个处理的 Page 模型均表现为极显著水平,表明所构建的烤烟回潮模型具有真实性、有

效性.

表 1 Page 模型参数表

温度/ $^{\circ}\text{C}$	K	n	R^2	P
65	0.794 2	1.091 3	0.945 4	0.000 1
55	1.026 2	1.309 9	0.971 2	0.000 1
45	0.994 9	1.323 7	0.963 3	0.000 1
35	0.757 4	1.457 7	0.980 3	0.000 1

注: K 和 n 为模型参数, R^2 为决定系数, P 为假设检验结果.

应用 Mathematica 10.0 将不同温度条件下的 K

和 n 进项多项式拟合,结果如下:

$$K = -1.965\,58 + 0.118\,8 \times T - 0.001\,17 \times T^2; \quad (5)$$

$$n = 1.852\,15 - 0.011\,3 \times T. \quad (6)$$

利用(1)式、(2)式以及 Page 模型可知烤烟回潮的动力学模型为:

$$MR = \exp[(1.965\,58 - 0.118\,8 \times T + 0.001\,17 \times T^2) \times t^{1.852\,15 - 0.011\,3 \times T}],$$

式中: T 为回潮温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; t 为回潮时间,单位 h .

2.2.2 回潮模型的验证

随机各选取 1 座烟夹烤房与散叶插签烤房,均在烘烤温度降至 $50\,^{\circ}\text{C}$ 时开始利用回潮机进行回潮,

并每隔 25 min 取一次样测其含水量,对回潮过程中烟叶的水分参数的实验值与理论值进行验证,由图 3(a)可知,Page 模型的理论值与实际值的拟合度很高,决定系数 R^2 达到 0.957 3,由此可知,所建立的模型对 $50\,^{\circ}\text{C}$ 烟夹烤房的回潮特性预测的稳定性较好.然而由图 3(b)可知,针对于散叶插签烘烤所建模型的预测值与实际值的差异略大,对实际值与预测值进行回归分析,得回归方程的决定系数为 0.945 6,与烟夹烘烤相比略低,但依旧有较好的适用性,因此所建立的模型对不同回潮温度与不同装烟方式均有一定的适用性.

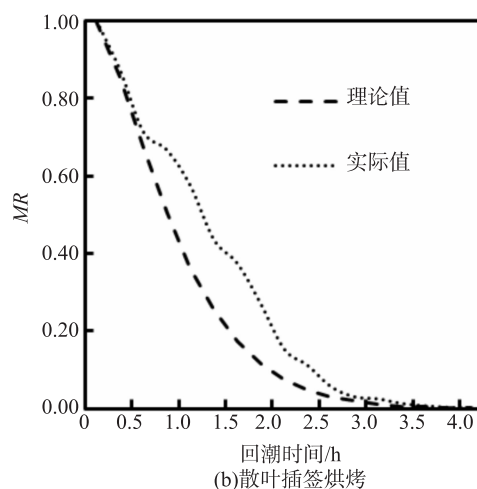
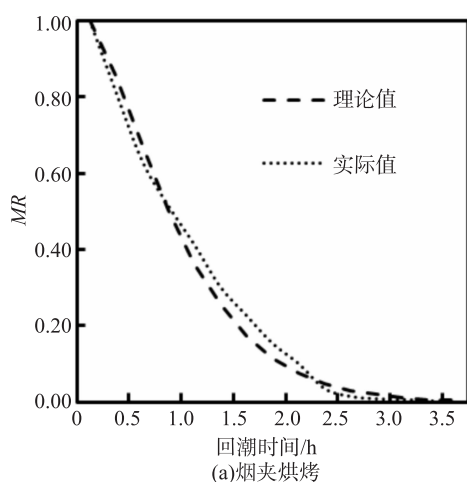


图3 实际值与理论值的比较

3 结论与讨论

1)各处理均能达到较好的回潮效果,其中以烤干后降至 $45\,^{\circ}\text{C}$ 与 $55\,^{\circ}\text{C}$ 的两个处理回潮效果最好.不同处理回潮过程烟叶的含水率变化呈对数规律上升,而烟叶的含水量比呈指数减少趋势,尤其是在 $45\,^{\circ}\text{C}$ 与 $55\,^{\circ}\text{C}$ 进行回潮时烟叶达到平衡含水率的时间较短,效率较高,这与谢已书等^[21]研究结果基本一致.就回潮效率而言, $65\,^{\circ}\text{C}$ 烟叶回潮效率较低,主要是 $65\,^{\circ}\text{C}$ 烤房的温度较高,使得烟叶水分的蒸发效率相对较高,烟叶净吸水量较少,导致回潮速率较低^[9]. $35\,^{\circ}\text{C}$ 时烟叶的回潮效率相对较低,尤其是烟叶的吸湿速率在前期很低,可能是由于温度较低,烤房空气内的绝对含湿量相对较低,烟叶与烤房空气的水分梯度较小,吸收的动能较弱,使得烟叶从空气中吸收的水分相对较少,导致烟叶的回潮效率较低^[15].

2)回潮后的烟叶表现为叶片回潮效果较好,但主脉的回潮基本不明显,烟叶出房时会有一定程度的造碎,对主脉的回潮还需进一步的研究;再者,强

制回潮与自然回潮相比,对烟叶质量有哪些影响尚未曾涉及,也需在后续研究中给予一定的关注.

3)随着科技的不断进步,烟叶生产将会向着高效化、智能化发展^[27],而回潮作为烟叶烘烤的重要环节,对烟叶生产效率的提高有重要作用,因此不断优化完善回潮技术则会成为将来对烟叶回潮研究的重要对策.由于 Page 干燥模型表达式参数少、拟合度高,能够准确的反应烤烟回潮的水分动态,因此在实际生产中,可以利用此模型进一步开展参数优化,开发回潮设备,实现精准控制烤烟的回潮效果,减少用电、用水能耗,提高生产效率,降低劳动成本,再者,回潮模型的构建可能会在一定程度上加速对烟叶回潮自动化控制研究的进程.

[参考文献]

- [1]黄锋,陈清,王乐,等.片烟增湿与干燥的薄层模型及动力学研究[J].中国烟草学报,2014,20(6):34-40.
- [2]郑松锦,李斌,王宏生,等.基于扩散模型的片烟增湿过程动力学分析[J].烟草科技,2010(8):5-9.

- [3] 李秀芳. 烟片松散回潮关键工艺参数过程控制系统的优化设计[J]. 中国烟草学报, 2015(3): 34-42.
- [4] 姚光明, 李晓, 邓国栋, 等. 真空回潮工序对河南烟叶加工质量的影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2010, 25(1): 5-8.
- [5] 张宗盛, 张朝晖, 侯小波. 制丝车间真空回潮烟叶信息防错系统设计[J]. 自动化应用, 2013(1): 18-20.
- [6] 白晓莉, 邹泉, 董伟, 等. 工艺加工对再造烟叶致香成分、有害成分和感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2009(10): 14-18, 22.
- [7] 刘国栋, 王旭峰, 李向阳. 制丝工艺参数对烟叶叶丝耐加工性和填充值的影响[J]. 河南农业科学, 2015(8): 145-148.
- [8] 许淑红, 熊安言, 赵伟民, 等. 真空回潮对烟叶质量的影响[J]. 烟草科技, 2007(5): 12-14.
- [9] 姚光明, 乔学义, 申玉军, 等. 真空回潮工序对烤烟烟叶感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2011(3): 5-8.
- [10] 姚光明, 邓国栋, 王慧. 松散回潮回风温度对云南烟叶加工物理质量和感官质量的影响[J]. 烟草科技, 2009(12): 9-12.
- [11] 曹洁穹, 王健强, 樊亚玲, 等. 微波加热松散在片烟制丝工艺中的应用[J]. 烟草科技, 2006(3): 5-8.
- [12] 邓国栋, 姚光明, 李晓, 等. 松散回潮工序加工强度对烤烟烟叶感官特性的影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 32-35.
- [13] 唐军, 周冰, 唐丽, 等. 松散回潮工序加工强度对烟丝致香物质的影响[J]. 江西农业学报, 2015(3): 66-69.
- [14] 周学政, 何蓉, 李东亮, 等. 松散回潮工艺参数对卷烟叶丝常规化学成分的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 137-140.
- [15] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 宫长荣, 陈江华, 吴洪田, 等. 密集烤房[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] 宫长荣, 杨焕文, 艾复清, 等. 烟草调制学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [18] 郭亮, 黄辉, 朱维华, 等. 不同温湿度条件下烤后烟叶回潮效果分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(27): 265-269.
- [19] 浦秀平, 徐世峰, 任杰, 等. 不同装烟方式对密集烘烤效率及烟叶质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2013(4): 98-102.
- [20] 杜德强, 姜清治, 袁佳, 等. 密集烤房烟叶烘烤强制回潮与自然回潮的对比试验[J]. 耕作与栽培, 2012(2): 28-28.
- [21] 谢已书, 卢贤仁, 姜均, 等. 温度、回潮机气压对烤后烟叶加湿回潮的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(13): 7708-7710.
- [22] 曾令彬, 赵思明, 熊善柏, 等. 风干白鲢的热风干燥模型及内部水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 280-283.
- [23] AGHBASHLO M, KIANMEHR M H, ARABHOSSEINI A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1348-1355.
- [24] BELLAGHA S, SAHLI A, FARTH A, et al. Studies on salting and drying of sardine (*sardinella aurita*): experimental kinetics and modeling[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 947-952.
- [25] 陈怡群, 常春, 胡志超, 等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 255-259.
- [26] TOMMASI O. Rational cohomology of $M-3, M-2$ [J]. Compositio Mathematica, 2007, 143(4): 986-1002.
- [27] VIKTO M S, KENNETH C. Big data a revolution[M]. London: John Murray General Publishing Division, 2013.

