

文章编号: 1001 - 9014(2008)03 - 0185 - 05

基于烟羽掩膜的森林火点 MODIS 探测方法研究

彭光雄¹, 沈蔚², 胡德勇³, 李京⁴, 陈云浩⁴

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2 上海水产大学, 上海 200090;

3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要:针对 MODIS 的林火探测算法第四版区域适应性差的不足, 利用基于热带雨林特性的潜在火点判定阈值和基于烟羽掩膜的自适应窗口调节技术, 对第四版算法进行了改进. 烟羽掩膜有利于辅助火点探测, 而调整阈值则能改善火点探测的敏感性. 根据热带雨林地区森林火灾的特点, 潜在火点判定阈值在无烟羽区设为 306K, 在烟羽掩膜区设为 295K. 烟羽掩膜可以有效圈定背景像元的范围, 增加自适应窗口空间统计分析的约束条件, 减少由于降低烟羽掩膜区潜在火点判定阈值而引起的噪声. 应用实际火点数据对两种算法进行了比较验证分析. 结果表明改进算法后提高了对低温小火点和大扫描角火点探测的敏感性, 增强了热带雨林地区的火点探测能力和探测精度.

关键词:森林火灾; 火点探测; 烟羽掩膜; 中分辨率成像光谱仪

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

METHOD TO IDENTIFY FOREST FIRE BASED ON SMOKE PLUMES MASK BY USING MODIS DATA

PENG Guang-Xiong¹, SHEN Wei², HU De-Yong³, LI Jing⁴, CHEN Yun-Hao⁴

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Ocean College of Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;

3. College of Resource Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China;

4. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Due to the poor regional adaptability of MODIS fire detection algorithm version 4, an improved method based on adjusted thresholds for tropical rainforest fire and smoke plume mask contextual analyse was applied in tropical rainforest. Smoke plume is propitious to enhance the identifiability of forest fire. Adjusted thresholds can improve the sensitivity of fire detection. According to the characteristic of tropical rainforest, for smoke plume pixels and non smoke plume pixels, the thresholds of potential fire pixels were adjusted to be 295K and 306 K, respectively. Smoke plume mask can delineate the scope of background pixels and add some constraints to contextual analyse. This can reduce the noise caused by low threshold. Two methods were compared and they were proven to be validated by using forest fire ground data. The improved algorithm has higher sensitivity for small fires in tropical rainforest especially for fires detected at large scan angles, and it increases the ability and accuracy to detect fire spots on regional scale.

Key words: forest fire; fire detection; smoke plumes mask; MODIS

引言

自 EOS Terra / Aqua 卫星成功发射以来, MODIS 数据在森林火情监测中的应用研究日益受到世界各国的重视, 出现了多种基于 MODIS 的火点探测算法^[1-4]. 国内在火灾红外光谱探测、大气影响以及烟雾检测等方面也作了比较深入的研究^[5-8]. MODIS 火点探测第四版 (V4) 算法采用基于窗口空间分析

的动态阈值^[3], 在地表变化较大的区域比较灵活和有效, 从而得到广泛的应用. 然而 MODIS 的 V4 算法主要针对全球的火点探测而设计的, 它在区域性的火点监测方面存在一定的局限性^[4]. 由于受环境因素和区域性火灾特点的影响, V4 算法对于热带雨林地区规模较小、温度较低的火点仍然难以探测. 本文根据马来西亚热带雨林森林火灾的特点, 利用基于区域特性的潜在火点判定阈值和基于烟羽掩膜的窗

收稿日期: 2007 - 10 - 21, 修回日期: 2008 - 02 - 20

基金项目: 国家自然科学基金“城市地表能量收支与人为热排放的遥感研究”(40671130)、“多源遥感数据像素级融合的统一理论框架”(40671122), 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金.

作者简介: 彭光雄, (1978 -), 男, 湖南永州人, 中国科学院遥感应用研究所博士后, 主要从事资源环境遥感等研究.

Received date: 2007 - 10 - 21, revised date: 2008 - 02 - 20

口空间分析技术,对 MODIS 的 V4 火点探测算法进行了改进研究。

1 林火探测原理

基于 MODIS 数据探测火点的基本原理是利用 $4\mu\text{m}$ 和 $11\mu\text{m}$ 波段的亮温,根据背景辐射和森林燃烧时的辐射差异,通过建立适当的模型来自动提取火点信息。MODIS 的 V4 算法主要由 3 个基本部分组成^[3]:即判定初步阈值以确定潜在火点;基于窗口特征的空间统计分析以从潜在火点中进行火点确认;排除假火点。潜在火点阈值的确定是个重要而敏感的问题,如果阈值设得过高,就会遗漏火点像元,反之如果设得过低就会在背景像元中引入较多的噪声而产生较多的假火点。MODIS 的 V4 算法在全球范围内应用固定阈值 (310K) 来判定潜在火点。就全球范围而言,不能为了探测小火点而将其判定潜在火点的初始阈值设定得过低;但在区域范围而言,判定潜在火点的初始阈值可以设定得相对低一些,以识别低温火点,提高区域尺度火点探测的精度^[4]。由于火灾发生的可能性和强弱程度与可燃物类型和气候条件的变化密切相关,因此对于区域性的火点监测而言,潜在火点的判定阈值也应该根据区域特征加以调整。另外,在 MODIS 的 V4 算法中,潜在火点的有效背景像元的选取也是个非常关键的参数,它将对用于判定潜在火点是否为真实火点的动态阈值的确定有着重要的影响。利用森林燃烧所产生的烟羽可以对潜在火点的有效背景像元进行辅助定位,提高潜在火点判定为真实火点的成功率^[4]。

2 数据与方法

马来西亚地区 2005 年 8 月 12、14、19 和 21 日四景 MODIS 影像和实际火灾统计数据用于对火点探测算法的比较分析与结果验证。MODIS LIB 的 MOD02 和 MOD03 数据由马来西亚国家遥感中心提供,实际火灾统计数据由马来西亚森林局提供。

DL6.0 (ENV 4.2) 交互式数据语言用于算法程序实现。

在森林火灾发生的早期,规模比较小,温度低,其发射的热红外辐射的能量因为树冠顶棚的覆盖而减小,使得卫星接收的热辐射信号比较微弱,不利于热点的探测。然而,许多火灾发生时往往释放出烟羽,研究表明利用烟羽的位置和范围有助于识别规模比较小的火点^[4]。通常情况下燃烧的效率越低,其释放的烟羽就越多。马来西亚属热带雨林地区,植

表 1 用于火点探测的 MODIS 波段及其特征

波段号	中心波长 (μm)	参数代码	用途
1	0.65	1:反射率	云掩膜
2	0.86	2:反射率	云掩膜
3	0.47	3:反射率	烟羽掩膜
7	2.13	7:反射率	烟羽掩膜
8	0.41	8:反射率	烟羽掩膜
9	0.44	9:反射率	烟羽掩膜
19	0.94	19:反射率	烟羽掩膜
22	4.0	T ₂₂ :亮温	火点识别
31	11.0	T ₃₁ :亮温	火点识别
32	12.0	T ₃₂ :亮温	云掩膜

物的含水率通常都很高,导致燃烧的温度和效率偏低,不充分的燃烧产生大量的烟尘,在近地表形成烟羽。本文在 MODIS 的 V4 算法的基础上对其进行两点改进,一是增加基于烟羽掩膜的窗口空间分析技术,二是根据马来西亚热带雨林森林火灾的特点经统计分析对潜在火点判定阈值进行适当的调整。

3 算法改进

由于烟羽掩膜需要利用 MODIS 的可见光波段来进行监测,因此基于烟羽掩膜的改进算法只适用于白天的 MODIS 火点探测,对于夜晚的 MODIS 火点探测在此不作讨论。用于火点探测改进算法的 MODIS 波段及其用途如表 1 所示。改进算法流程如图 1 所示,用 DL6.0 语言进行程序实现,算法描述如下。

3.1 水体和云掩膜

水体掩膜可以从 MODIS 的 MOD03 数据中获取,云掩膜仍然采用 V4 算法的监测方法。

3.2 烟羽掩膜

烟羽检测采用 Xie 的烟探测算法^[4,9],选取非水体且非水体的像元作为候选像元,如果这些候选像元满足公式 (1) 则判定为烟羽像元。

$$\begin{aligned} & \{0.15 \quad (T_{19} - T_{19}) / (T_{19} + T_{19}) \quad 0.5\} \\ & \text{and} \{ (T_{9} - T_{7}) / (T_{9} + T_{7}) \quad 0.30\} \\ & \text{and} \{ (T_{8} - T_{3}) / (T_{8} + T_{3}) \quad 0.09\} \\ & \text{and} \{ T_{8} \quad 0.09\} \quad , \quad (1) \end{aligned}$$

式中变量的含义见表 1 所示。

3.3 潜在火点判定

MODIS 的 V4 火点探测算法中假定 $T_{22} > 310\text{K}$ 的像元标识为潜在火点,而将 $T_{22} < 310\text{K}$ 的像元标识为非火点。这个阈值对于马来西亚热带雨林地区而言,相对过高,许多没有探测到的规模较小、温度

较低的火点 T_{22} 的亮温值往往小于 310K,这种情况在扫描角度较大的地区更加明显.通过对马来西亚地区不同季节、不同可燃物类型的近 300个火点的统计分析,发现部分小火点的 T_{22} 的亮温值高于 306K而小于 310K,如果使用 310K的阈值来判定潜在火点,则这部分小火点将无法探测到.为了提高对规模较小、温度较低的火点探测的敏感性,减少由于扫描角度较大引起的误差,经统计分析得出白天非烟羽像元的潜在火点判定阈值调整为 $T_{22} > 306K$,白天烟羽像元的潜在火点判定阈值调整为 $T_{22} > 295K$ 当白天非烟羽像元满足公式 (2)中的条件时,白天烟羽像元满足公式 (3)中的条件时,则该像元为潜在火点像元.

$$\{ (T_{22} > 306K) \text{ and } (T_{22} - T_{31} > 10K) \text{ and } (\sigma_2 > 0.3) \} \quad (2)$$

$$\{ (T_{22} > 295) \text{ and } (T_{22} - T_{31} > 10K) \text{ and } (\sigma_2 > 0.3) \} \quad (3)$$

式中变量的含义见表 1所示.

3.4 绝对火点判定

绝对火点的判定采用 Kaufman的方法^[11],如果像元的 22波段的亮温 T_{22} 满足公式 (4)的条件,则判定为绝对火点.

$$T_{22} > 360K \quad (4)$$

式中变量的含义见表 1所示.

3.5 背景特性分析

对被判定为潜在火点的像元,需要采用自适应窗口的空间统计方法来对潜在火点像元逐个进行判识.在进行空间统计时需要用到有效背景像元的概念.有效背景像元是指以潜在火点的像元

为中心并且满足以下四个条件的像元^[31]: 1)所获取的遥感数据为非损坏数据; 2)该像元为陆地像元; 3)该像元为非云像元; 4)该像元为非背景火点像元,背景火点像元是指白天时 $T_{22} > 325K$ 并且 $T_{22} - T_{31} > 20K$ 的像元.以潜在火点像元为中心,从 $5 \times 5, 7 \times 7$,依次搜索到 21×21 的窗口大小,当有效背景像元的数量占整个窗口像元数量的 25%时停止搜索.

3.6 相对火点判定

获取有效背景像元后,采用上下文空间统计方法对相对火点进行判定.相对火点的判定条件如下^[31]:白天的像元满足公式 (5),则此像元为火点.

$$\begin{aligned} & (T_{22} - T_{31} > \overline{T_{22} - T_{31}} + 3.5 \sigma_{T_{22} - T_{31}}) \\ & \text{and } (T_{22} - T_{31} > \overline{T_{22} - T_{31}} + 6K) \\ & \text{and } (T_{22} > \overline{T_{22}} + 3 \sigma_{T_{22}}) \\ & \text{and } \{ (T_{31} > \overline{T_{31}} + \sigma_{T_{31}} - 4K) \\ & \text{or } (\sigma_{T_{22}} > 5K) \} \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $T_{22} - T_{31}$ 为有效背景像元 $T_{22} - T_{31}$ 亮温差的平均值, $\sigma_{T_{22} - T_{31}}$ 为有效背景像元 $T_{22} - T_{31}$ 亮温差的平均绝对偏差, $\overline{T_{22}}$ 和 $\overline{T_{31}}$ 分别为有效背景像元 T_{22} 和 T_{31} 亮温的平均值, $\sigma_{T_{22}}$ 和 $\sigma_{T_{31}}$ 分别为有效背景像元 T_{22} 和 T_{31} 亮温的平均绝对偏差, $\sigma_{T_{22}}$ 为背景火点像元 T_{22} 的亮温平均绝对偏差.

利用烟羽检测,对烟羽掩膜区域使用 295K的潜在火点判定阈值,则可以将低温小火点探测出来.如图 2所示,某个像元窗口内所有像元的亮温值都小于 306K若使用 306K的判定阈值,则有效潜在火点像元数为 0个.若应用烟羽掩膜阈值技术,则可以将掩膜覆盖下的亮温大于 295K且小于 306K的像元标识为有效潜在火点像元,则该像元窗口有效潜在火点像元的个数为 9个.因此利用烟羽掩膜低温阈值可以提高对低温小火点的探测能力,然而在此同时也引入了较多的噪声.减少噪声的方法是,对自

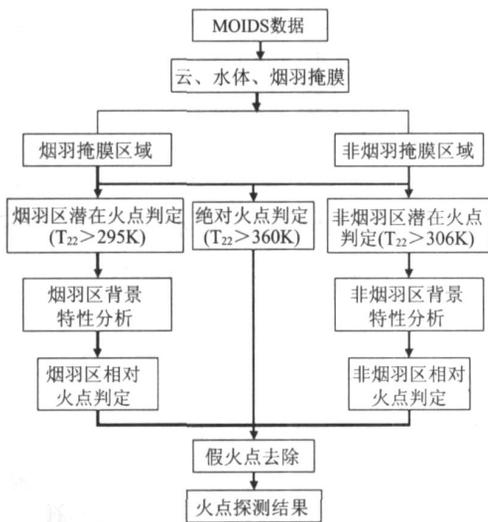


图 1 MODIS火点探测改进算法流程图
Fig 1 The flowchart of improved algorithm for fire detection using MODIS data

302	300	296	300	301
299	301	297	298	296
302	298	299	297	293
301	303	297	294	297
300	293	296	293	299
294	291	292	298	295
299	300	297	294	300
301	302	295	301	295
304	299	303	298	296

图例说明
294—烟羽掩膜
299—有效潜在火点像元

图 2 基于烟羽掩膜的潜在火点判定示意图
Fig 2 The judgement of potential fire hotspot based on smoke plume mask

适应窗口进行背景特性分析和空间统计时,候选像元只在烟羽掩膜内选取.烟羽掩膜的使用可以有效圈定背景像元的范围,增加自适应窗口空间统计分析的约束条件,在烟羽掩膜区调整潜在火点判定阈值增加噪声的同时,通过烟羽掩膜限制背景像元的范围来减少噪声,保证低温火点探测的精度.烟羽掩膜外的区域仍按 V4 算法的空间分析方法进行相对火点的判定^[3].

3.7 假火点去除

经过上述步骤后确认为火点的,对于白天的 MODIS 影像,则还需要去除假火点,消除耀光、热沙漠和裸地、沿海岸对火点判识的干扰.假火点的去除方法仍然采用 V4 算法中的方法^[3],这里不作详细介绍.

4 结果分析

火点探测算法的优劣可从判对率和虚警率这两个方面进行衡量.判对率等于判对火点像元的数量与实际林火像元数量的百分比.虚警率等于误判火点像元的数量与探测火点像元数量的百分比.马来西亚地区 2005 年 8 月 12、14、19 和 21 日四景 MODIS/Terra 影像用于对火点探测改进算法与 V4 算法进行比较分析与结果验证.据火灾地面统计资料,这四天共有几十个地区发生火灾,实际火点像元 122 个,其中 8 月 12 日 74 个,8 月 14 日 35 个,8 月 19 日 7 个,8 月 21 日 6 个.进一步对改进算法与 V4 算法的火点探测判对率和虚警率进行统计分析,结果如表 2 所示.由表 2 可知,V4 算法探测正确的总火点数量为 96 个,改进算法探测正确的火点数量为 109 个,而实际火点数量为 122 个,两者总的判对率分别为 79% 和 89%,两者的虚警率则分别为 17% 和 18%.两者的虚警率基本上相差不远,而在判对率和对小火点的敏感性方面,改进算法明显要比 V4 算法提高了许多.

表 2 改进算法与 V4 算法火点判识结果统计

Table 2 The statistics of fire hotspots identification results between improved algorithm and V4 algorithm

日期	实际火点	探测火点像元数量		判对火点像元数量		判对率 (%)		虚警率 (%)	
		V4	改进	V4	改进	V4	改进	V4	改进
12	74	73	82	60	66	81	89	18	19
14	35	32	39	27	32	77	92	16	18
19	7	6	7	5	6	71	86	17	14
21	6	5	6	4	5	67	83	20	17
合计	122	116	134	96	109	79	89	17	18

表 3 改进算法新增的探测火点统计

Table 3 The statistics of new fire hotspots detected by improved algorithm

火点日期	经度 (°)	纬度 (°)	T_{22} (K)	$T_{22}-T_{31}$ (K)	扫描角 (°)
1 (12)	100.46	0.89	296.80	22.99	27.41
2 (12)	101.32	1.67	301.06	30.95	29.96
3 (12) #	100.03	1.24	303.34	32.95	23.02
4 (12)	100.20	1.21	305.38	33.16	24.57
5 (12) #	103.60	-3.91	306.60	16.53	51.14
6 (12)	104.74	-2.83	307.13	27.15	54.21
7 (12)	103.59	-3.92	307.71	16.78	51.35
8 (12) #	104.15	-2.71	308.67	21.36	52.59
9 (12)	98.66	3.16	308.66	14.73	3.25
10 (14)	109.70	-0.88	299.84	8.64	54.70
11 (14) #	109.71	-0.88	305.38	15.06	54.71
12 (14)	111.39	0.84	307.14	20.64	54.83
13 (14)	103.12	-2.87	308.44	12.88	27.37
14 (14) #	104.23	-4.05	309.94	17.04	37.25
15 (14)	104.21	-4.10	309.97	16.28	37.30
16 (14)	104.22	-4.00	309.98	16.83	38.10
17 (19)	100.49	0.85	306.17	31.18	21.55
18 (21)	93.85	12.28	308.13	20.63	54.86

带 # 者为误判点

V4 算法对于扫描角较大 (大于 45°) 的区域火点探测能力较弱,主要原因是卫星传感器接收的物体辐射能量随着扫描角的增大而减少,同样规模的火点在大扫描角处观测的亮温要比小扫描角观测的亮温要低.如表 3 所示,改进算法新增加的 18 个探测火点中,有 8 个火点的扫描角大于 45°,由于改进算法对低温小火点具有较强敏感性,从而在大扫描角区域比 V4 算法具有更强火点探测能力.V4 算法能探测到的火点改进算法都能探测到,而有些 V4 算法探测不到的火点改进算法也能探测到.改进算法新增加的 18 个探测火点中,有 5 个为误判点,表 3 中带 # 符号者为误判火点.改进算法新增火点探测的精度为 72%.改进算法和 V4 算法的虚警率分别为 18% 和 17%,基本处于同一水平,因此改进算法在提高对小火点探测能力的同时,并保持了一定的火点探测精度.

5 结论与讨论

本文利用基于区域特性的潜在火点判定阈值和基于烟羽掩膜的自适应窗口调节技术,对 MODIS 的 V4 火点探测算法进行了改进.调整后的潜在火点判定阈值可以增强对低温火点的探测能力.烟羽掩膜的使用可以有效圈定背景像元的范围,增加自适应窗口空间统计分析的约束条件,在降低潜在火点判

定阈值增加噪声的同时,通过烟羽掩膜限制背景像元的范围来减少噪声,保证低温火点探测的精度.改进算法提高了对低温小火点和大扫描角的火点探测的敏感性,增强了区域尺度火点的探测能力和探测精度.验证分析时仅用了四景 MODIS火灾图像用于比较分析,因此还需要开展大量的实验和验证工作,对改进算法进一步测试和检验.

致谢 本研究得到马来西亚国家遥感中心(MA-CRES)的数据支持,在此表示感谢.

REFERENCES

- [1] Kaufman Y J, Justice C O, Giglio L, *et al* Potential global fire monitoring from EOS/MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 215—238.
- [2] Justice C O, Giglio L, Kaufman Y, *et al* The MODIS fire products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 244—262.
- [3] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, *et al* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 273—282.
- [4] Wang W T, Qu J J, Hao X J, *et al* An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**: 163—170.
- [5] PENG Guang-Xiong, CHEN Yun-Hao, LI Jing, *et al* Combination of remote sensing and meteorological data for fire risk monitoring—a case study in peninsular Malaysia [J]. *Geomatic Science* (彭光雄, 陈云浩, 李京, 等. 结合遥感和气象数据的森林火险监测研究—以马来西亚半岛为例. *地球信息科学*), 2007, **9**(5): 99—104.
- [6] ZHANG Xiao-Hua, ZHANG Ren-Cheng, GONG Xue, *et al* Detection and estimation of early fires' process character by using infrared spectrum [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张晓华, 张认成, 龚雪, 等. 火灾早期过程特征的红外光谱探测和诊断. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 382—385.
- [7] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, *et al* Study on CBERS-2'S CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭光雄, 何宇华, 李京, 等. 中巴地球资源 02星 CCD图像交叉定标与大气校正研究. *红外与毫米波学报*). 2007, **26**(1): 22—25.
- [8] XIE Qi-Yuan, ZHANG He-Ping, ZHANG Yong-Ming, *et al* Experimental study on Stokes scattering matrixes of smoke particles [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢启源, 张和平, 张永明, 等. 火灾烟颗粒 Stokes散射矩阵的实验研究. *红外与毫米波学报*). 2007, **26**(4): 279—283.
- [9] Xie Y, Qu J, Hao X. Smoke plume detecting using MODIS measurements in eastern United States [C]. East FIRE Conference Proceedings, Fairfax, VA, 2005, May 11—13.

(上接 164页)

子链方向的紧密排列分不开的.偏振光谱研究进一步演示了量子点沿量子链方向紧密排列所造成的类似于量子线的各向异性发光特性.

REFERENCES

- [1] Binberg D, Grundman M, Ledentsov N N. *Quantum Dot Heterostructures*[M]. Chichester: Wiley, 1999.
- [2] HAO Guo-Qiang, ZHANG Yong-Gang, GU Yi, *et al* Performance analysis of extended wavelength InGaAs photovoltaic detectors grown with gas source MBE [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郝国强, 张永刚, 顾溢, 等. 气态源分子束外延生长扩展波长 InGaAs探测器性能分析. *红外与毫米波学报*) 2006, **25**(4): 241—245.
- [3] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al* Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚, 顾溢, 朱诚. 短波红外 InGaAs/InP光伏探测器系列的研制. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 6—9.
- [4] MA Wen-Quan, Richard Nötzel, Achim Trampert, *et al* Self-organized quantum wires formed by elongated dislocation-free islands in (In, Ga)As/GaAs(100) [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**: 1297—1299.
- [5] Mazur Yu I, MA Wen-Quan, Wang X, *et al* InGaAs/GaAs three-dimensionally-ordered array of quantum dots [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**: 987—989.
- [6] WANG Zhi-Ming, Holmes K, Salamo G J, *et al* Fabrication of (In, Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100) [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**: 1931—1933.
- [7] WANG Zhi-Ming, Mazur Yu I, Salamo G J, *et al* Control on self-organization of InGaAs/GaAs(100) quantum-dot chains [J]. *J. Vac Sci & Technol*, 2005, **B23**: 1732—1735.
- [8] MA Wen-Quan, Richard Nötzel, Klaus H Pöggendorf, *et al* Shape transition of coherent three-dimensional (In, Ga)As islands on GaAs(100) [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**: 4219—4221.
- [9] Mazur Yu I, Liang B L, WANG Zhi-Ming, *et al* Time-resolved photoluminescence spectroscopy of subwetting layer states in InGaAs/GaAs quantum dot structures [J]. *J. Appl Phys*, 2006, **100**: 054316(1)—054316(5).
- [10] XU Zhong-Ying, LU Zhen-Dong, YUAN Zhi-Liang, *et al* Carrier relaxation and thermal activation of localized excitons in self-organized InAs multilayers grown on GaAs substrates [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**: 11528—11531.
- [11] Gurio li M, Sanguinetti S, Grilli E, *et al* Disorder-induced localized states in InAs/GaAs multilayer quantum dots [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**: 2262—2264.
- [12] A tsumi Tackeuchi, Yoshiaki Nakata, Shunichi Muto, *et al* Time-resolved study of carrier transfer among InAs/GaAs multi-coupled quantum dots [J]. *Jpn J. Appl*, 1995, **34**: L1439—L1441.
- [13] LI Q ing, XU Zhong-Ying, GE Wei-Kun. Carrier capture into InAs/GaAs quantum dots detected by a simple degenerate pump-probe technique [J]. *Solid State Communication*, 2000, **115**: 105—108.