

## 封育条件下草地光谱反射特征及地上生物量估测\*

陈 功, 王建伟

(云南农业大学动物科学技术学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 2005年7月至2006年4月, 对云南省马龙县封育草地和过牧草地的光谱反射率、草层高度、覆盖度和地上生物量进行了测定, 分析了归一化植被指数 (NDVI) 及比值植被指数 (RVI) 与地上生物量之间的相关性。结果表明: 过牧草地封育1年之后, 其草层高度、覆盖度和地上生物量显著增加, 光谱反射特征也相应地发生明显变化。450~850 nm 范围内, 两种草地不同季相条件下在各波段的光谱反射率差异均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 覆盖度及季节变化对近红外波段的影响明显大于可见光波段。旺盛生长期 (7月) 和枯黄期 (11月), 封育草地具有植被反射型特征, 而自由放牧草地表现为植被-土壤型; 返青期 (4月) 两种草地均表现为土壤型。过牧草地地上生物量与两种植被指数之间无显著相关性。封育草地地上生物量与 NDVI, RVI 之间存在显著的 ( $P < 0.05$ ) 非线性相关, 旺盛生长期和返青期 NDVI 与地上生物量的相关性强于 RVI, 枯黄期 RVI 与地上生物量相关性强于 NDVI。

**关键词:** 草地封育; 反射光谱; 植被指数; 生物量估测; NDVI; RVI

**中图分类号:** S 688.4.01    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-390X (2008) 04-0462-06

## Spectral Reflectance and Aboveground Biomass Estimation of the Grassland under Protection Condition

CHEN Gong, WANG Jian-wei

(Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** From July 2005 to April 2006, the spectral reflectance, aboveground biomass of protected grassland and free grassland were measured and analyzed in Malong County of Yunnan province. The aims of this research were to understand the spectral reflectance under different coverage and aspectation conditions and quantify the correlation between vegetation indices and aboveground biomass of 2 different grasslands. It was showed that grassland coverage and aspectation had significant effects on its spectral reflectance. After 12 months protection from using, the protected grassland had higher canopy, coverage and aboveground biomass, compared with free grazing grassland area, thus, significantly ( $P < 0.01$ ) increased or decreased its spectral reflectance in the near infrared wave bands or visible wave bands. During vigorous growth period (July) and dead ripe period (November), the protected grassland had reflectance type of vegetation, but free grazing grassland represented vegetation-soil type, due to the lower canopy, coverage and above ground biomass. During the greenup period (April), the protected grassland and free grazing grassland had the same spectral reflectance type of soil, although the reflectances were significantly different between both of them at all wavelengths. Spectral vegetation indices NDVI and RVI had significant ( $P < 0.05$ ) nonlinear correlation with the aboveground biomass of the protected

收稿日期: 2007-08-27    修回日期: 2007-10-25

\* 基金项目: 云南省自然科学基金项目资助 (2004C0038M); 云南省自然科学基金重点项目 (2003C0008Z)

作者简介: 陈功 (1965-), 男, 内蒙古达拉茂人, 博士, 副教授, 主要从事草地农业研究。

E-mail: chengong65@126.com

grassland in three growth seasons. The protected grassland aboveground biomass could be estimated by NDVI both in vigorous growth period and dead ripe period and by RVI in greenup period.

**Key words:** protected grassland; spectral reflectance; vegetation index; biomass estimation; NDVI; RVI

草地光谱反射特征是草地植被、土壤、大气、地带性和水分含量等多种因素影响而形成的综合反映。草地植被具有与其它绿色植被类似的光谱反射特征,反射率大小主要受到草地类型、植被盖度、植物叶绿素及水分含量、土壤背景和大气状况等多种因素的影响。此外,植物生育期、叶片的形状、大小、着生位置对草地光谱反射率都有明显影响。已有的研究结果证明,草地光谱反射率具有明显的季节变化规律<sup>[1~4]</sup>;草地植被具有渐进光谱反射规律,草地植被光谱反射率随着植被盖度和生物量的增大而增加,当生物量和盖度增加到一定程度后,随着生物量和盖度的增大草地光谱反射率值不再增加,而是趋于一个常数;草地地上生物量与植被指数之间具有明显的相关性,如比值植被指数 RVI (ratio vegetation index) 和归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index) 对绿色植被变化灵敏,对土壤或者枯草不灵敏,RVI 和 NDVI 能较好地反映出草地的覆盖度、生物量和叶面积指数,与地上现存净初级生物量有较好的非线性相关性。草地遥感技术是近 20 年来迅速发展起来的一种新型技术手段,在草地类型调查、草地地物光谱测定、草地资源监测、草地灾害监测和预报等方面都得到了广泛应用。国内外草地工作者利用植被光谱反射特征建立了多种植被指数<sup>[5~7]</sup>,并在多种农作物<sup>[8~11]</sup>、天然植被及草地估产<sup>[12~21]</sup>等方面建立了一系列植被-光谱转化公式,用以估算植被叶面积指数、地上生物量等指标。近年来,草地遥感技术已由实验研究进入生产应用,由定性描述进入定量分析,由静态调查进入动态监测阶段,多平台、多时相遥感数据的综合利用已成为草地科学中一个十分活跃的研究领域之一。本文以云南省马龙县封育草地和过牧草地为研究对象,测定两种草地不同季节的反射光谱率,分析地上生物量与植被指数之间存在的相关性。探求封育条件下草地基况与其反射光谱特征之间的相关性,并筛选可用于草地地上生物量估测的植被指数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于云南省马龙县月望乡螳螂村东部约 1 km 处(北纬 25°11', 东经 103°18'),海拔 2 036.8 m,地势平坦。年平均降水量 1 024.1 mm,5~9 月占全年降水量的 73%。年均温 13.5℃,最冷月 1 月平均温度 6.4℃,最热月 7 月平均温度 18.7℃,≥10℃的年积温为 3 100~4 500℃。无霜期约 251 d。土壤为红壤,偏酸性。

过牧草地于 2004 年 7 月开始围栏封育。2005 年 7 月,封育草地群落中主要植物有白茅 (*Imperata cylindrical*)、白健秆 (*Eulalia pallens*)、画眉草 (*Eragrostis pilosa*)、星星草 (*Puccinellia tenuiflora*)、火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*)、西南委陵菜 (*Potentilla fulgens*)、矮生胡枝子 (*Lepedeza forrestii*)、西南杭子梢 (*Campylotropis delavayi*)、车前 (*Plantago asiatica*)、云南龙胆 (*Gentiana yunnanensis*)、四脉金芒 (*Eulalia quadrinervis*)、翻白叶 (*Potentilla griffithii*)、丝叶球柱草 (*Bulbostylis lisdensa*) 等。自由放牧区(退化草地)主要植物有白茅、火绒草和西南委陵菜等。

### 1.2 试验设计

选择草地旺盛生长(2005 年 7 月中旬)、枯黄(2005 年 11 月上旬)和返青(2006 年 4 月中旬)3 个时期,在封育区和自由放牧区分别随机选取 15 个测试点,先测定植被冠层光谱反射率,观测主要植物物候期,然后测定草地盖度、高度和地上生物量。以每个测试点为中心选取草地 0.25 m<sup>2</sup>,测定主要植物自然生长高度;针刺法测定覆盖度;齐地面刈割,测定地上生物量。

选用美国 Ocean 公司生产的 HR2000 光谱仪,仪器视场角 1°,波段范围 200~1 100 nm,分辨率约为 1 nm。反射光谱选择晴朗无云的天气,观测时间为北京时间 10:00~14:00 之间,测量时固定光谱仪探头垂直向下,距离草地冠层 30 cm。计算 15 次测定值的平均值作为各波段反射率,测定

过程中及时进行标准白板校正。

试验数据采用 SPSS 13.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地光谱反射

#### 2.1.1 旺盛生长期草地光谱反射特征

草地旺盛生长期，封育区平均覆盖度、地上生物量分别为 73.3% 和 600.8 g/m<sup>2</sup>，垂直结构明显。草地植被大致可分为两层，星星草、画眉草、火绒草等占据上层，高度可达 64 cm；第二层高度在 10~28 cm 之间，主要是白茅、西南委陵菜和四脉金芒等。自由放牧区草层低矮，无明显垂直结构，覆盖度和地上生物量分别为 41.0% 和 178.5 g/m<sup>2</sup>。

表 1 中列出了封育区、自由放牧区草地在主要特征波段的光谱反射率。可以看出，自由放牧

区在各个波段的反射率均高于封育区。在可见光反射区域 (400~650 nm)、红边反射区域 (680~700 nm) 和 750 nm 以后的近红外区域，自由放牧区光谱反射率均极显著高于封育区 ( $P < 0.01$ )。

封育区与自由放牧区相比较，具有明显不同的反射光谱特征。封育区具有典型绿色植被反射特征。在可见光区域内，波长较短的蓝光 (450 nm) 部分反射值很低；在 550 nm 和 650 nm 附近分别形成明显的反射峰和吸收谷；大于 700 nm 的近红外区域为强烈反射区，形成一个高反射平台，反射率大于 50%。自由放牧区具有绿色植被反射型向土壤反射型过渡的特征，分别在 600 nm 和 650 nm 处出现一个较小的反射峰和吸收谷，从 700 nm 处开始反射率迅速上升，在近红外波段也形成一个高反射区域，反射率达到 69% 以上。

表 1 旺盛生长期封育区和自由放牧区草地光谱反射率

Tab. 1 Spectral reflectances of the protected grassland and the free grazing grassland in July

波长/nm wavelength	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
封育区 protected grassland	1.90 B	3.38 B	4.18 B	9.95 B	7.56 B	6.14 B	11.38 B	53.48 B	59.73 B	61.29 B	63.96 B
自由放牧区 free grazing grassland	7.79 A	11.10 A	14.37 A	29.50 A	31.36 A	29.13 A	34.67 A	69.10 A	73.61 A	75.48 A	75.59 A

注：表中同列内数字之后的不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )，下同。

Note: Different capitals in the same column mean extremely significant difference ( $P < 0.01$ ), the same as below.

#### 2.1.2 枯黄期草地光谱反射特征

枯黄期封育区和自由放牧区草地平均盖度分别是 87% 和 44%，地上生物量分别为 858.9 g/m<sup>2</sup> 和 176.4 g/m<sup>2</sup>。封育草地植被分层现象明显，上层是白茅、四脉金芒及其立枯物，植株高度达到 97.8 cm，平均高度在 40 cm 左右。四脉金芒等高大植物的倒伏使得该时期植被覆盖度比旺盛生长期还要大。下层主要是火绒草、翻白叶等已经枯黄、枯萎且低矮的物种。优势种白茅大面积枯黄，叶色普遍呈现暗红色，叶尖尤为明显，少部分仍处于开花末期，种子开始脱落；四脉金芒处于开花末期，种子开始成熟，叶色较深；西南委陵菜、翻白叶部分枯死，立枯叶片呈紫红色；火绒草为开花末期，叶片灰绿，少数开始枯黄；星星草、画眉草等也开始枯黄。火绒草、翻白叶、白茅、西南委陵菜等植物基部叶片仍呈现绿色。

表 2 中列出了枯黄期封育区和自由放牧区主

要特征波段的光谱反射率。可以看出，除了 400 nm 之外，与旺盛生长期相反，封育区在各个特征波段上的反射率均高于自由放牧区，差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

与旺盛生长期相比较，枯黄期封育草地在可见光区域无明显变化，而在近红外区域有明显下降趋势。自由放牧区各波段的光谱反射率明显低于旺盛生长期，特别是在近红外区域降低幅度最大，750 nm，800 nm，850 nm 和 900 nm 处反射率分别从 69.10%，73.61%，75.48% 和 75.59% 下降到 24.68%，25.33%，23.67% 和 15.29%。

封育区仍然具有典型绿色植物反射特征，在绿光 550 nm 处有一个明显的反射峰，红光 650 nm 附近为光谱吸收谷，在 700~750 nm 之间快速增长，近红外波段为强烈反射区，形成一个高反射区域。自由放牧区在可见光范围内反射率缓慢增长，在 700~750 nm 之间出现快速增长趋势，已

经表现出土壤反射型的特征。

表2 枯黄期封育区和自由放牧区草地光谱反射率

Tab. 2 Spectral reflectances of the protected grassland and the free grazing grassland in November

波长/nm wavelength	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
封育区 protected grassland	1.11 A	4.42 A	5.79 A	11.72 A	9.87 A	8.03 A	14.29 A	49.57 A	51.33 A	49.75 A	40.34 A
自由放牧区 free grazing grassland	1.13 A	3.22 B	4.52 B	8.07 B	7.74 B	7.43 B	11.28 B	24.68 B	25.33 B	23.67 B	15.29 B

### 2.1.3 返青期草地反射光谱特征

2006年4月中旬,试验区草地群落处于返青期。封育区和自由放牧区植被覆盖度分别为62%和27%,地上生物量分别为505.4 g/m<sup>2</sup>和104.38 g/m<sup>2</sup>。封育草地分层现象不明显,白茅株高42.3 cm,西南委陵菜和火绒草等株高在10 cm左右。白茅上部叶色呈现暗红色,叶尖干枯,植株基部出现新的分蘖枝条;西南委陵菜、翻白叶部分返青,草地群落中仍有少量立枯物;火绒草存在少数枯叶,返青叶片灰绿;四脉金芒、星星草和画

眉草基部出现新的分蘖枝条。

从表3中可以看出,在450~700 nm范围内,自由放牧区光谱反射率极显著高于封育区,而在750~900 nm范围内极显著低于封育区。与旺盛生长期及枯黄期相比较,两种草地群落在近红外波段反射率大幅度下降,反射率不足20%。虽然两种草地群落在各个波段的反射率存在显著差异,但均未出现明显的反射峰或吸收谷。在400~800 nm范围内,反射率随着波长的增加而增大,均具有明显的土壤反射型的特征。

表3 返青期封育区和自由放牧区草地光谱反射率

Tab. 3 Spectral reflectances of the protected grassland and the free grazing grassland in April

波长/nm wavelength	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
封育区 protected grassland	1.44 A	3.56 B	5.16 B	7.04 B	8.37 B	9.45 B	11.74 B	16.94 A	18.18 A	17.56 A	11.41 A
自由放牧区 free grazing grassland	0.98 B	3.81 A	5.76 A	7.49 A	8.83 A	10.01 A	12.20 A	15.76 B	16.44 B	3.83 B	3.70 B

### 2.2 植被指数与地上生物量相关性分析

在试验数据分析基础上,选取可见光波段R(650 nm)和近红外波段IR(850 nm)构建RVI和NDVI两种植被指数,对不同季相条件下草地上生物量与植被指数的相关性进行分析。分析结果表明:自由放牧区地上生物量与两种植被指数均不存在显著相关性( $P > 0.05$ );而封育区地上生物量与植被指数RVI,NDVI之间均存在显著的非线性相关关系( $P < 0.05$ )。

在不同的季相条件下,封育草地上生物量与两种植被指数之间存在不同的相关关系。旺盛生长期,地上生物量与RVI,NDVI之间均为幂函数,与NDVI之间的相关系数较高;枯黄期均表现为多项式,地上生物量与RVI之间的相关系数

较高;返青期分别为对数函数和幂函数,地上生物量与NDVI之间的相关系数较高(表4)。

### 3 结论与讨论

(1) 草地植被覆盖度与其光谱反射特征密切相关。试验区退化草地封育1年之后,与自由放牧区相比较,植被覆盖度明显增加。封育区旺盛生长期和枯黄期覆盖度分别达到73%和87%,反射光谱在可见光波段出现明显的反射峰和吸收谷,在近红外波段出现高反射区域,具有典型绿色植被反射光谱的特征。自由放牧区植株低矮且覆盖度小,旺盛生长期和枯黄期覆盖度分别为41%和44%,光谱反射率受土壤背景影响较大,其光谱反射特征表现为植被-土壤型;返青期覆盖度仅

为 27%，土壤背景的影响更大，光谱反射特征表现为土壤型。因此，封育不仅改变了草地群落的

覆盖度、生物量等数量特征，也相应地改变了草地的光谱反射特征。

表 4 封育草地地上生物量 (Y) 与植被指数 (X) 之间的相关分析

Tab. 4 Correlation between the aboveground biomass (Y) of the protected grassland and vegetation indices (X stands for RVI or NDVI) in different seasons

植被季相 vegetation aspects	植被指数 vegetation indices	产草量估测回归方程 regression equations	相关系数 correlation coefficients ( $R^2$ )
旺盛生长期 vigorous growth period (July)	RVI	$Y = 77.317X^{0.3520}$	0.7597
旺盛生长期 vigorous growth period	NDVI	$Y = 1120.3X^{3.3703}$	0.7613
枯黄期 dead ripe period (November)	RVI	$Y = 0.2916X^2 + 49.846X + 287.99$	0.9129
枯黄期 dead ripe period	NDVI	$Y = 13162X^2 + 15293X + 4687.3$	0.8753
返青期 greenup period (April)	RVI	$Y = 244.77 \ln(X) + 299.3$	0.7241
返青期 greenup period	NDVI	$Y = 1070.7X^{0.6317}$	0.8433

(2) 草地季相是影响其反射光谱特征的重要因素之一。返青期封育区和自由放牧区在近红外波段反射率均有明显下降的趋势。封育区在旺盛生长期和枯黄期均表现出典型绿色植被反射光谱的特征，而在返青期却表现出与自由放牧区相似的反射光谱特征，即明显的土壤型。返青期封育草地中存在大量的立枯物、枯枝落叶和较少的返青枝条，虽然植被覆盖度仍然较高 (62%)，但分层现象不明显，在 400 ~ 800 nm 范围内，光谱反射率随着波长的增加而增大。反射光谱是绿色植物、土壤、大气、水分等多因子作用形成的综合反射，试验区在 2006 年 4 月中旬气候干燥、植物返青期较往年推迟，返青物种比例小；地上部分立枯物少，草层高度降低，植被盖度较旺盛生长期、枯黄期明显下降，草地反射光谱受地面背景影响较大。上述因素的综合作用显著降低了两种草地返青期在近红外区域的反射率。

(3) 封育草地不同季相条件下，其地上生物量与植被指数 NDVI, RVI 之间均存在显著的非线性相关性。旺盛生长期、返青期植被指数 NDVI 与地上生物量的相关性高于 RVI，枯黄期 RVI 与地上生物量相关性高于 NDVI。草地季相不同，其覆盖度、植物生育期、地上生物量存在明显差异，光谱反射特征随之发生变化。本文试验结果与李建龙、赵德华等对 4 种草地类型的研究结果相符<sup>[22,23]</sup>，即草地植被覆盖度较低时，NDVI 对盖度增减反应灵敏，在盖度较大时，NDVI 趋向饱和，NDVI 较 RVI 能很好地适应植被盖度稀疏、

盖度差异悬殊的区域；而 RVI 在植物生长后期与地上生物量的相关性较好。

#### [参考文献]

- [1] 李建龙, 黄敬峰, 王秀珍. 草地遥感 [M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [2] 刘富渊. 草地光谱反射的基本特征 [J]. 中国草原, 1988, (4): 20-25.
- [3] 胡新博, 冯克明. 山地高草草甸光谱反射特性与估产 [J]. 草食家畜, 1997, (4): 49-52.
- [4] 胡新博. 草地光谱与牧草产量的相关分析 [J]. 草食家畜, 1996, (4): 43-47.
- [5] 田庆久, 闵详军. 植被指数研究进展 [J]. 地球科学进展, 1998, 13 (4): 327-333.
- [6] 乌云娜, 翡浩. 草地遥感监测中植被指数的误区 [J]. 遥感技术与运用, 2000, 12 (3): 41-45.
- [7] JEFF SETTLE. On the dimensionality of multi-view hyperspectral measurements of vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 235-242.
- [8] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 棉花高光谱及其红边特征 (I) [J]. 棉花学报, 2003, 15 (3): 146-150.
- [9] 唐延林, 王秀珍, 王人潮, 等. 玉米高光谱及其红边特征分析 [J]. 山地农业生物学报, 2003, 22 (3): 189-194.
- [10] 李云梅, 倪绍祥, 黄敬峰. 高光谱数据探讨水稻叶片叶绿素含量对叶片及冠层光谱反射特性的影响 [J]. 遥感技术与运用, 2003, 18 (1): 1-5.
- [11] HANSENA P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indi-

- ces and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 542–553.
- [12] 李博. 中国北方草地畜牧业动态监测研究 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
- [13] 牟新待, 龙瑞军, 陈功. 高山草地光谱反射特征及其估产模式 [J]. *草业科学*, 1994, (6): 59–64.
- [14] 龙瑞军, 牟新待, 陈功. 高山草地的反射光谱与牧草长势的相关分析 [J]. *草业科学*, 1994, (2): 53–55.
- [15] 顾详, 胡新博, 王承军, 等. 遥感监测中草地生产力野外实测体系的建立和资料的采集方法 [J]. *草食家畜*, 1997, (2): 46–48.
- [16] 黄敬峰, 王秀珍, 胡新博. 新疆北部不同类型天然草地产草量遥感监测模型 [J]. *中国草地*, 1999, (1): 11–18.
- [17] 李建龙, 蒋平. 遥感技术在面积天然草地估产和预报中的应用探讨 [J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1998, 23 (2): 153–157.
- [18] 黄敬峰, 王秀珍, 王人潮, 等. 天然草地牧草产量遥感综合监测预测模型研究 [J]. *遥感学报*, 2001, 5 (1): 69–74.
- [19] 王艳荣. 利用多时相近地面反射波谱特征对不同退化等级草地的鉴别研究 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (3): 406–413.
- [20] 王艳荣, 刘玉燕. 内蒙古草原不同空间尺度的植被反射波谱特征分析与鉴别 [J]. *内蒙古大学学报*, 2001, 32 (1): 83–88.
- [21] 李建龙, 黄敬峰, 维纳汗. 不同类型草地监测与估产遥感指标和光学模型建立的研究 [J]. *中国草地*, 1996, (6): 6–10.
- [22] 赵德华, 朱明, 宋子健. 3S技术在草地产量生态成因分析与农业资源估测中的应用研究 [J]. *中国草地*, 2003, 25 (3): 15–23.



(上接第 441 页)

- [12] 杨振杰, 卢善发. 植物嫁接基础理论研究 (下) [J]. *生物学通报*, 1995, 30 (10): 4–6.
- [13] 刘德先, 吴秉钧, 余志敏, 等. 果树林木育苗大全 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [14] 李保印, 刘用生, 周秀梅, 等. 柳属与杨属植物远缘嫁接研究 [J]. *生物学通报*, 2004, 39 (10): 19–20.
- [15] 李建光, 潘学文, 李荣, 等. 储良龙眼嫁接不亲和性研究 [J]. *中国南方果树*, 2002, 31 (3): 27–28.
- [16] MOORE R, WALKER D B. Studies on vegetative compatibility-incompatibility in higher plants. I. A structural study of a compatible autograph in *Sedum telephoides* (Crassulaceae) [J]. *Am J Bot*, 1981, 68: 820–830.
- [17] MOORE R, WALKER D B. Studies on vegetative compatibility-incompatibility in higher plants. II. A structural study of an incompatible heterograft between *Sedum telephoides* (Crassulaceae) and *Solanum pennelli* (Solanaceae) [J]. *Am J Bot*, 1981, 68: 831–842.
- [18] WEATHERHEAD I. Causes of graft failure in Sitka spruce (*Picea sitchensis*-Bomg. – Carr.). Ph. D. thesis [D]. University of Reading, 1986.
- [19] YEOMAN M M. Cellular recognition systems in grafting [A]. In: Linkskens H F, Heslop-Harrison I. Cellular Interaction, *Encyclopaedia of Plant Physiology, New Series* (Vol. 17) [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [20] PINA A, PILAR E. A review of new advances in mechanism of graft compatibility-incompatibility [J]. *Scientia Horticulturae*, 2005, 106 (1): 1–11.
- [21] YEOMAN M M, BROWN R. Implications of the formation of the graft union for organization in the intact plant [J]. *Ann Bot*, 1976, 40: 1265–1276.