

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.01681

水稻高光谱红边位置与叶层氮浓度的关系

田永超 杨杰 姚霞 朱艳 曹卫星*

南京农业大学 / 江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 江苏南京 210095

摘要: 实时无损监测叶片氮素状况对水稻精确氮素管理具有重要意义。本研究基于多年不同施氮水平和不同水稻品种的田间试验观测资料, 系统分析了水稻高光谱红边区域和位置特征与冠层叶片氮浓度的定量关系。结果表明, 水稻冠层的红边区域光谱受施氮水平和品种影响较大, 一阶导数光谱在红边区域出现“三峰”现象。经典的红边位置(660~750 nm 之间光谱反射率的一阶导数最大值)由于“三峰”特征现象而对水稻氮素浓度变化不够敏感, 难以适用于水稻氮素状况的准确监测。基于倒高斯模型、线性内插法和线性外推法构造的红边位置随水稻氮浓度呈现连续变化模式, 适用于水稻叶层氮浓度的定量监测; 另外, 基于 695 nm、700 nm 和 705 nm 等 3 个波段的拉格朗日算法也可估测水稻叶层氮浓度。比较不同红边位置发现, 改进型线性外推法较其他几种算法更能有效地监测水稻冠层叶片氮浓度。
关键词: 水稻; 红边位置; 改进型线性外推法; 氮浓度; 监测模型

Quantitative Relationship between Hyper-Spectral Red Edge Position and Canopy Leaf Nitrogen Concentration in Rice

TIAN Yong-Chao, YANG Jie, YAO Xia, ZHU Yan, and CAO Wei-Xing*

Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture / Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Real-time and non-destructive monitoring of crop nitrogen status is needed for precision management and dynamic regulation in rice fertilization. This research made a systematic analysis on the characteristics of the first-derivative reflectance spectra in red edge area, and the quantitative relationships between red edge position (REP) with different algorithms and canopy leaf nitrogen concentrations in the conditions of different nitrogen rates and rice varieties in different seasons of field-grown rice. The results showed that spectrum in red edge area was significantly affected by nitrogen levels and varietal types, and “three-peak” feature could be observed with the first derivative spectrum in this area. Traditional REP (the maximum value of the first derivative spectra in 670–780 nm range) was not sensitive to canopy leaf nitrogen concentration because of the three-peak feature, but the REPs based on inverted Gaussian fitting, linear four-point interpolation, linear extrapolation and adjusted linear extrapolation generated continuous REP data, and could be used to estimate canopy leaf nitrogen concentration. Besides, REP from a three-point Lagrangian interpolation with three first-derivatives bands (695, 700, and 705 nm) also had a good relationship with canopy leaf nitrogen concentration. Comparison of these REPs based on different approaches indicated that the adjusted linear extrapolation method $(755FD_{730}+675FD_{700}) / (FD_{730}+FD_{700})$ gave the best prediction of canopy leaf nitrogen concentration, with relative simple algorithm, and thus is a good REP parameter for monitoring canopy leaf nitrogen concentration in rice.

Keywords: Rice; Red edge position; Adjusted linear extrapolation; Leaf nitrogen concentration; Monitoring model

氮素是影响作物生长发育和产量形成最重要的营养元素。施氮过多, 容易造成农田污染; 施氮过少, 不能保证作物产量和品质。因此, 氮肥运筹已成为作物生产管理中最主要的农艺措施^[1]。如何根据作物长势及氮素状况确定适宜的追肥量^[2], 是实现作物精确追氮调控的关键环节^[3]。这就需要在作物生

产过程中准确、快速、实时地监测作物氮素状况和长势动态, 以实现按需施肥和精确管理。

随着现代遥感技术的发展, 植物生长监测研究已扩展到包括氮素在内的植株化学成分的估测, 并为评价植物长势和生理参数提供可靠的理论和实践支撑^[4]。很多学者通过测量植物冠层或叶片的反射

本研究由国家自然科学基金项目(30571092 和 30671215), 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA10Z202 和 2006AA10Z271), 教育部高等学校博士学科重点专项科研基金项目(20070307035), 国家科技支撑计划项目(2006BAD10A01 和 2008BADA4B02)资助, 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0797), 江苏省创新学者攀登项目(BK20081479)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 曹卫星, E-mail: caow@njau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: yctian@njau.edu.cn

Received(收稿日期): 2008-12-11; Accepted(接受日期): 2009-04-17.

光谱,发现利用可见光到近红外区域的反射率可估测植株氮素水平^[4-9]。Bonham-Carter 等^[10]定义了 660~750 nm 之间光谱反射率的一阶导数最大值为“红边”位置参数,并开始了高光谱参数“红边”位置与叶绿素等色素关系的研究。随着叶绿素含量的提高,红边位置向长波方向偏移^[11-12],因此红边位置常被用来监测植株叶绿素含量^[13]。吴长山等^[14]指出,水稻、玉米在叶片水平上反射光谱的导数以及“红边”位置与叶片叶绿素浓度和叶绿素密度都存在显著相关;赵春江等^[15]初步研究了地面高光谱数据的红边特性与小麦叶片全氮及叶绿素含量的关系;Collins 等^[16]研究了 10 种树木和禾谷类作物的经典红边位置与叶绿素指标的关系;Miller 等^[17]利用倒高斯模型红边位置估算了植被冠层叶绿素状况。进一步的研究表明,植被导数光谱存在明显的双峰或多峰特征^[12,18-19],如叶片叶绿素含量较低时,红边位置出现在 700 nm 附近,当叶绿素含量较高时红边位置出现在 725 nm 附近^[12,19],说明红边位置对叶绿素含量的变化不够敏感。为了克服红边位置的双峰或多峰现象和不连续问题,不少学者提出了几种拟合红边位置的方法加以解决。如 Bonham-Carter 等^[10]提出利用倒高斯模型拟合红边位置(IG)的方法;Guyot 和 Baret^[20]提出基于 4 点线性插值的拟合红边位置的方法;Dawson 和 Curran^[21]提出利用 3 波段的拉格朗日插值拟合红边位置的算法;Cho 和 Skidmore^[19]提出基于线性外推的拟合红边位置方法等。这些方法在很多植被的氮素、色素和叶面积状况估测中已被证实有良好效果^[19,22],但能否借鉴这

些方法对水稻冠层叶片氮素状况进行定量反演,有待进一步探索和阐明。

本研究目的是利用不同水稻品种和施氮水平的多项试验资料,系统分析水稻高光谱红边区域位置特征与叶层氮浓度的定量关系,进而建立基于红边位置的水稻叶层氮浓度监测模型,为实时、快速和无损获取水稻氮素状况提供技术基础。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

观测资料来自于 5 个水稻田间试验,涉及不同的品种类型、施氮水平、年份和地点(表 1)。

试验 I 于 2004 年在江苏省农业科学院实验农场进行,供试水稻品种为武香粳 9 号、日本晴和华粳 2 号。土壤质地为黄棕壤土,含有机质 2.44%、全氮 0.17%、有效磷 14.03 mg kg⁻¹、有效钾 118.78 mg kg⁻¹。设 4 个施氮(纯 N)水平,即 N0, 0 kg N hm⁻²; N2, 105 kg N hm⁻²; N3, 210 kg N hm⁻²; N5, 315 kg N hm⁻²。小区面积为 18 m²(4.0 m × 4.5 m),随机区组设计,3 次重复,5 月 16 日播种,6 月 19 日移栽。氮肥按基肥 60%、促花肥 20%、保花肥 20%的比例施入,配施 135 kg hm⁻² P₂O₅, 210 kg hm⁻² K₂O,全部作基肥。移栽株行距为 14 cm × 30 cm。其他管理措施同当地水稻高产栽培田块。本试验资料用于模型检验。

试验 II 于 2005 年在南京市农林局江宁试验站进行,供试品种为武香粳 14 和 27123。土壤质地为黏土,含有机质 1.61%、全氮 0.136%、碱解氮 74.7 mg kg⁻¹、速效磷 10.36 mg kg⁻¹、速效钾 82.6 mg kg⁻¹。

表 1 田间试验基本情况及采样时间

Table 1 Seasons, cultivars, nitrogen rates, and sampling dates in five field experiments

试验和年份 Experiment & year	品种 Cultivar	施氮水平 Nitrogen rate (kg N hm ⁻²)	小区面积 Plot area (m ²)	采样日期 Sampling date (month/day)	数据用途 Data use
Exp.I, 2004	武香粳 9 号 WXJ 9	0, 105, 210, 315	18	9/2, 9/12, 9/23, 9/30, 10/12	模型检验
	华粳 2 号 HJ 2			8/27, 9/2, 9/11, 9/23, 9/30	Model validation
	日本晴 Nipponbare			8/27, 9/2, 9/11, 9/23	
Exp.II, 2005	武香粳 14 WXJ 14	0, 90, 270, 420	31.5	7/15, 8/9, 8/16, 9/5, 9/13,	建模
	27123			9/29, 10/10, 10/23	Model development
Exp.III, 2006	武香粳 14 WXJ 14	0, 90, 270, 405	25	7/28, 8/9, 8/18, 9/7, 9/17, 9/25, 10/5	建模 Model development
Exp.IV, 2006	盐粳 9967 YJ 9967	0, 105, 210, 315, 420	8100	7/29, 9/10	模型检验 Model validation
Exp.V, 2007	扬辐粳 8 YFJ 8	0, 210, 420	8100	9/8, 10/9	模型检验
					Model validation

设4个施氮(纯N)水平, 即N0, 0 kg N hm⁻²; N1, 90 kg N hm⁻²; N4, 270 kg N hm⁻²; N7, 420 kg N hm⁻²。小区面积为31.5 m² (3.5 m × 9.0 m), 随机区组排列, 3次重复, 5月16日播种, 6月20日移栽。氮肥按基肥35%、分蘖肥15%、促花肥25%、保花肥25%施入, 另外基施135 kg hm⁻² P₂O₅, 190 kg hm⁻² K₂O。移栽株行距为15 cm × 25 cm。其他管理同当地水稻高产栽培田块。本试验资料用于模型构建。

试验 III 于2006年在南京市江宁试验站进行。供试品种为27123和武香粳14, 设4个施氮水平, 即施纯氮0(N0)、90(N1)、270(N4)、405(N6) kg hm⁻²。小区面积为5.0 m × 5.0 m, 随机区组排列, 3次重复, 株行距为0.15 m × 0.25 m, 5月18日播种, 6月20日移栽。土壤含全氮0.136%、有机质1.61%、碱解氮74.7 mg kg⁻¹、速效磷10.36 mg kg⁻¹、速效钾82.6 mg kg⁻¹。氮肥按基肥35%、分蘖肥15%、促花肥25%、保花肥25%施入, 另外各小区基施P₂O₅ 135 kg hm⁻², K₂O 190 kg hm⁻²。该试验资料用于模型的构建。

试验 IV 于2006年在江苏省方强农场(位于大丰市北部)进行。供试品种为盐粳9967, 设5个施氮水平, 即0(N0)、105(N2)、210(N3)、315(N5)、420(N7) kg N hm⁻², 基追比为5:5, 包括基肥、促花肥和保花肥, 重复2次, 各区配施P₂O₅ 150 kg hm⁻², K₂O 200 kg hm⁻²做基肥一次施用。小区面积为90 m × 90 m。5月15日播种, 6月16日移栽, 其他管理措施同当地大田栽培管理。该试验资料用于模型的检验。

试验 V 于2007年在江苏省方强农场(位于大丰市北部)进行。供试品种为扬辐粳8号, 设3个氮水平, 分别为0(N0)、210(N3)、420(N4) kg N hm⁻², 基追比为5:5, 包括基肥、促花肥和保花肥, 各区配施P₂O₅ 150 kg hm⁻², K₂O 200 kg hm⁻²做基肥一次施用。小区面积(长×宽)为90 m × 100 m, 重复2次, 随机区组排列。5月12日播种, 6月15日移栽, 其他管理措施同当地大田栽培管理。该试验资料用于模型检验。

1.2 高光谱信息获取

采用美国 Analytical Spectral Device (ASD) 公司生产的 FieldSpec Pro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪测量水稻冠层光谱。ASD 高光谱仪的波段范围为350~2 500 nm, 其中350~1 000 nm 光谱采样间隔为1.4 nm, 光谱分辨率为3 nm; 1 000~2 500 nm 光谱采样间隔为2 nm, 光谱分辨率为10 nm。光谱获取与农学采样时间同步, 选择晴朗无云或少云天气,

于10:00~14:00(太阳高度角大于45°)测量高光谱, 探头距冠层垂直高度1 m, 视场角25°, 每次采集目标光谱前后都进行参考板校正, 在视场范围内重复测量10次取均值, 每小区重复测量5个视场, 取平均值作为该小区的光谱测量值。

1.3 农学参数测定

与光谱测量同步, 每次于每小区取水稻植株3穴(试验 IV 和 V 取5穴), 将叶片分离并测定叶面积, 在105℃下杀青30 min后, 再于80℃下烘至恒重, 获得植株和叶片干重。将同一时期同一小区所有绿色叶片混合样品粉碎后, 用浓硫酸混合催化剂消化, 半微量凯氏定氮法测定叶片全氮浓度, 以单位叶片干重的百分数表示。

1.4 不同红边位置的算法

表2列举了6种不同的红边位置算法。文献表明, 当某种植被红边区域的一阶导数光谱出现多峰时, 基于拉格朗日算法的红边位置会发生跳跃, 产生不连续现象^[12,23]。本研究发现, 水稻冠层的一阶导数光谱呈现“三峰”现象, 分别在700、720和730 nm附近出现峰值, 而基于拉格朗日算法的红边位置同样不连续。因此, 本文以700、720和730 nm 3个峰值波段为中心, 分别设置各中心波段附近5 nm或10 nm处等距或不等距的另外2个波段(如以700 nm为中心波长, 另外2个波长可为695 nm、705 nm或695 nm、710 nm等), 计算多个基于拉格朗日算法的红边位置, 并分析其与氮浓度之间的定量关系。

另外, 根据水稻冠层一阶导数光谱的显著特点, 即“三峰”分别出现在700、720和730 nm附近, 红谷出现在675 nm附近, 其中700 nm和730 nm附近峰值最明显, 将线性外推法的4个端点分别修改为675 nm、755 nm等2个波段的X坐标轴点和700 nm、730 nm等2个波段的一阶导数点。因此, 由675 nm波段的X坐标轴点和700 nm波段一阶导数点组成远红外线, 由730 nm处的一阶导数点和700 nm处的X坐标轴点组成近红外线, 两直线的交叉点对应的波长即红边位置, 如图1所示。

2 结果与分析

2.1 不同氮素水平对水稻红边区域反射率和一阶导数光谱的影响

将试验 II 和试验 III 所有叶层氮浓度值按高、中、较低和低分成4组, 以每组平均来反映不同氮水平

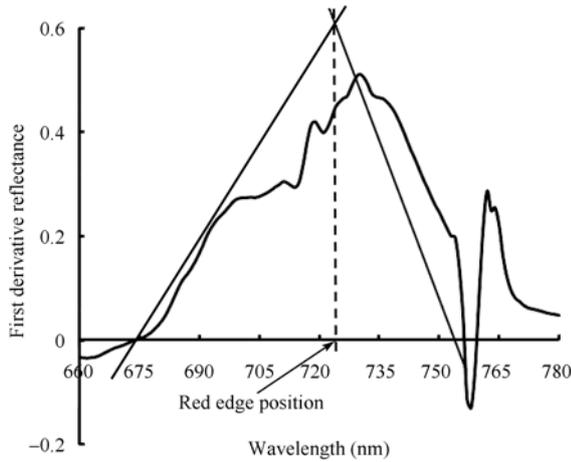


图 1 改进型线性外推方法拟合红边位置示意图

Fig. 1 Schematic representation of a red edge position model: adjusted linear extrapolation

下红边区域一阶导数光谱特征。结果显示, 不同氮素水平显著影响水稻冠层红边区域反射率光谱和一阶导数光谱(图 2-A, 图 3-A)。在红光起始端, 随着叶片氮水平的提高, 反射率降低, 之后随着波长右

移, 冠层反射率均迅速上升, 且在较高氮水平下冠层反射率上升较快; 至近红外端, 随着叶片氮水平的提高, 反射率升高, 在 700、720 和 730 nm 附近, 不同氮素水平的冠层反射率发生交叉跳跃。对应于反射率光谱, 一阶导数光谱在红边区域出现明显“三峰”, 其中最为明显的是 700 nm 和 730 nm 附近 2 个峰, 其次是在 720 nm 左右有一个小的突起; 随着氮素水平的提高, 红边位置发生红移。另外, 在 757 nm 附近可能受氧气吸收影响, 反射率出现小的凹槽, 致使一阶导数在此区域不连续, 出现负值。

2.2 不同品种对水稻红边区域反射率和一阶导数光谱的影响

研究发现, 不同水稻品种对红边区域反射率和一阶导数光谱的影响主要受株型和氮素浓度等因素控制, 株型由株高、LAI 和叶倾角决定。本文系统比较了相同生育期、相同氮素水平不同水稻品种的光谱特征(图 2-A, 图 3-B)。以抽穗期 LNC=2.32 为例, 日本晴在红边区域的反射率和红边幅值显著高于其他

表 2 不同红边位置的算法和来源
Table 2 Algorithm and references of different spectral indices

红边位置技术 REP technique	算法 Algorithm	参考文献 Reference
经典红边位置(670~780 nm 范围一阶导数最大值) $\lambda_{\max}(D_{\lambda(i)})$	$D\lambda(i)=[R_{\lambda(j+1)}-R_{\lambda(j)}]/\Delta\lambda$ $REP=\lambda_{\max}(D_{\lambda(i)})$	Horler et al. ^[12] , 1983
倒高斯模型红边位置 Inverted Gaussian REP	$R(\lambda)=R_s-(R_s-R_0)\exp\left(-\frac{(\lambda_0-\lambda)^2}{2\delta^2}\right)$	Miller et al. ^[17] , 1990
线性插值红边位置 Linear four-point interpolation REP	$REP(IG)=\lambda_0+\delta$ $R_{\text{red edge}}=(R_{670}+R_{780})/2$ $REP=700+40\frac{R_{\text{red edge}}-R_{700}}{R_{740}-R_{700}}$	Guyot et al. ^[20] , 1988
拉格朗日算法红边位置 Lagrangian REP	$REP=\frac{A(\lambda_i+\lambda_{i+1})+B(\lambda_{i+1}+\lambda_{i-1})+C(\lambda_{i-1}+\lambda_i)}{2(A+B+C)}$ $A=\frac{D_{\lambda(i-1)}}{(\lambda_{i-1}-\lambda_i)(\lambda_{i-1}+\lambda_{i+1})}$ $B=\frac{D_{\lambda(i)}}{(\lambda_i-\lambda_{i-1})(\lambda_i+\lambda_{i+1})}$ $C=\frac{D_{\lambda(i+1)}}{(\lambda_{i+1}-\lambda_{i-1})(\lambda_{i+1}+\lambda_i)}$	Dawson et al. ^[21] , 1998
线性外推法红边位置 Linear extrapolation REP	Far-red line: $FDR=m_1\lambda+c_1$ NIR line: $FDR=m_2\lambda+c_2$ $REP=-(c_1-c_2)/(m_1-m_2)$	Cho et al. ^[19] , 2006
改进型线性外推法红边位置 Adjusted Linear extrapolation	$(755\times D_{730}+675\times D_{700})/(D_{730}+D_{700})$	本文 This paper

λ 和 i 分别表示波长和波长编号; REP、R 和 D 分别为红边位置、光谱反射率和光谱反射率的一阶导数值; A、B 和 C 均为中间变量; O、S 和 δ 分别为红边区域内反射率最小时的波长、红肩波长和倒高斯半宽。

$\lambda, i, REP, R, D, O, S,$ and δ are wavelength, number of wavelength, red edge position, reflectance and the first derivative reflectance, wavelength with the minimum reflectance in red edge area, wavelength of red shoulder and inverted Gaussian model half width, respectively. A, B, and C are middle variables.

品种, 另外 4 个品种的反射率和微分光谱的变化与对应 LAI 的变化一致, 如武香粳 9 号、华粳 2 号、武香粳 14 和 27123 的 LAI 分别为 7.5、6.9、3.2 和 2.2, 其红边幅值依次增加。但日本晴的 LAI 为 4.19, 而红边幅值在 5 个品种中最大, 可能和它较低的株高、较小的叶倾角和较大的叶氮积累量有关。日本晴、武香粳 9 号、华粳 2 号、武香粳 14 和 27123 等 5 个品种此时的 LNA 分别为 6.12、6.23、5.19、4.95 和 3.11, 而这 5 个水稻品种叶倾角大小顺序为 27123>武香粳 14>武香粳 9 号>华粳 2 号>日本晴。

2.3 各种红边位置与冠层叶片氮含量的关系

考察 6 种不同红边位置与水稻冠层叶片氮浓度之间的关系, 发现传统一阶导数最大值所得红边位置随氮浓度变化发生跳跃, 出现多峰现象, 其中 3 个

主要的峰出现在 700、720 和 730 nm 附近, 因此其随叶片氮浓度的变化不连续, 难以直接应用于叶片氮含量的预测。而另外 5 种红边位置算法计算所得红边位置均随叶片氮浓度连续变化(图 4)。其中线性方法红边位置、倒高斯模型红边位置和拉格朗日红边位置随氮浓度变化较平缓, 而 2 种线性外推方法红边位置随氮浓度变化较快, 所产生的最大和最小红边位置范围也较前 3 种红边位置范围宽, 因此, 这两种红边位置算法可能更适合氮浓度的预测。另外, 线性方法红边位置值高于倒高斯红边位置值, 拉格朗日红边位置变化幅度最小, 6 种红边位置均与氮浓度呈正相关关系。

通过进一步分析各种算法红边位置与水稻冠层叶片氮浓度的定量关系, 发现线性方法和倒高斯红

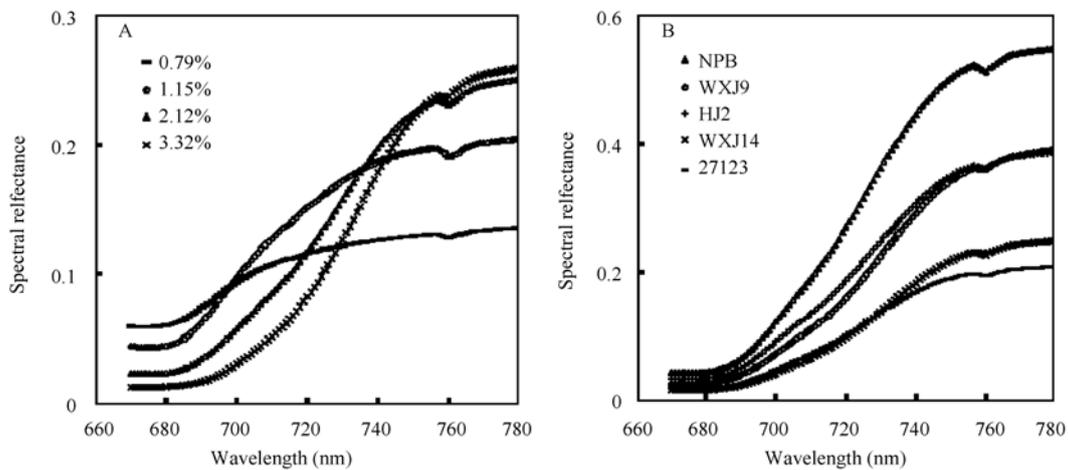


图 2 不同施氮水平(A)和抽穗期不同水稻品种(B)红边区域的反射率特征
Fig. 2 Characteristics of spectral reflectance in red edge area under different nitrogen levels (A) and different rice varieties at heading (B)

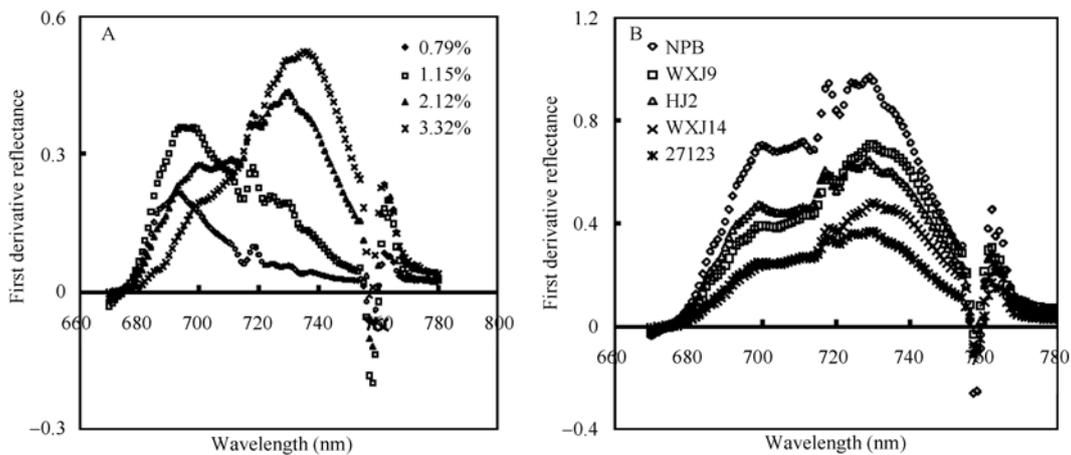


图 3 不同施氮水平(A)和抽穗期不同水稻品种(B)红边区域的一阶导数光谱特征
Fig. 3 Characteristics of first-derivative spectra in red edge area under different nitrogen levels (A) and different rice varieties at heading (B)

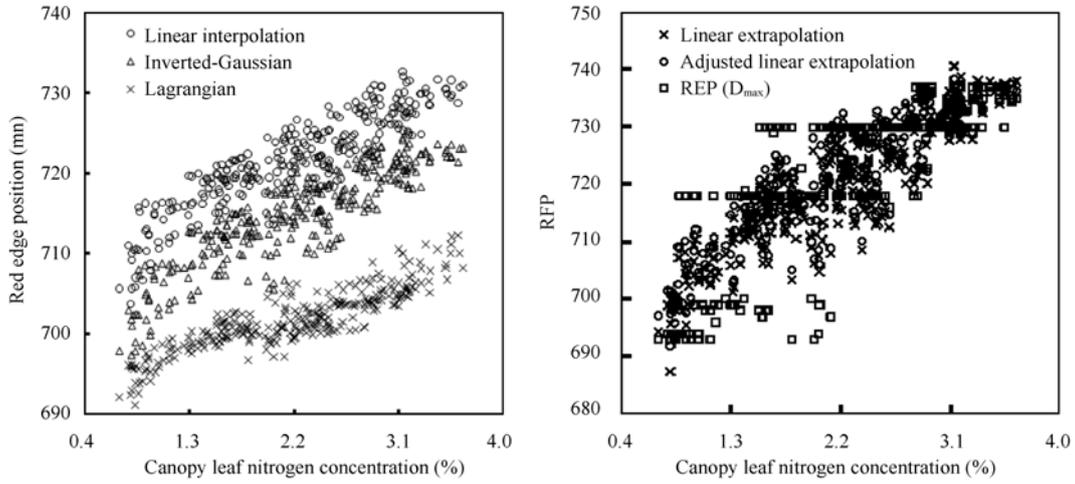


图 4 不同算法红边位置随水稻冠层叶片氮浓度的变化特征(n=291)

Fig. 4 Change patterns of canopy leaf nitrogen concentration to different REP based on different techniques (n=291)

边位置与水稻冠层叶片氮浓度呈明显的指数曲线关系, 在叶片氮浓度小于 1.5% 时曲线关系较明显, 易饱和(图 5-B, 图 6-A), 但线性相关也达到显著水平。线性外推方法红边位置和拉格朗日红边位置相比, 线性程度得到部分提高(图 5-A, 图 6-B)。总体来看, 当叶片氮浓度位于 1.5% 与 4.0% 之间时, 各种红边位置与叶片氮浓度呈线性关系, 具有较好的相关性和预测性, 从直线拟合模型的预测误差来看, 改进型红边位置预测误差最小, 经典红边位置最大, 其他几种红边位置差异不大。因红边位置数值与氮浓度数值相差较大, 存在数量级差异, 为了便于模型运行和计算, 表 3 列出将红边位置进行归一化处理 [(红边位置观察值-红边位置均值) / 标准差] 与氮浓度的关系模型。

2.4 基于红边位置的水稻冠层叶片氮浓度监测模型的检验

为进一步比较不同算法红边位置对水稻冠层叶片氮浓度的预测性, 利用不同年份、不同试验的独立资料对上述定量监测模型进行了测试和检验(表 4)。结果表明, 基于几种算法红边位置的曲线监测模型的预测效果总体不如直线拟合模型, 曲线模型的预测 *RMSE* 和 *RE* 值均显著大于相应直线拟合模型的预测值, 因此红边位置曲线拟合模型不适合估测水稻冠层叶片氮浓度。综合比较不同模型预测的 *R*²、*RMSE* 和 *RE* 值, 以改进型线性外推法预测效果最好, 其次为线性外推方法, 但另外几种算法的直线拟合模型预测结果也在接受范围。以拟合效果最好的改进型和线性外推模型预测的氮浓度与实测氮浓度作

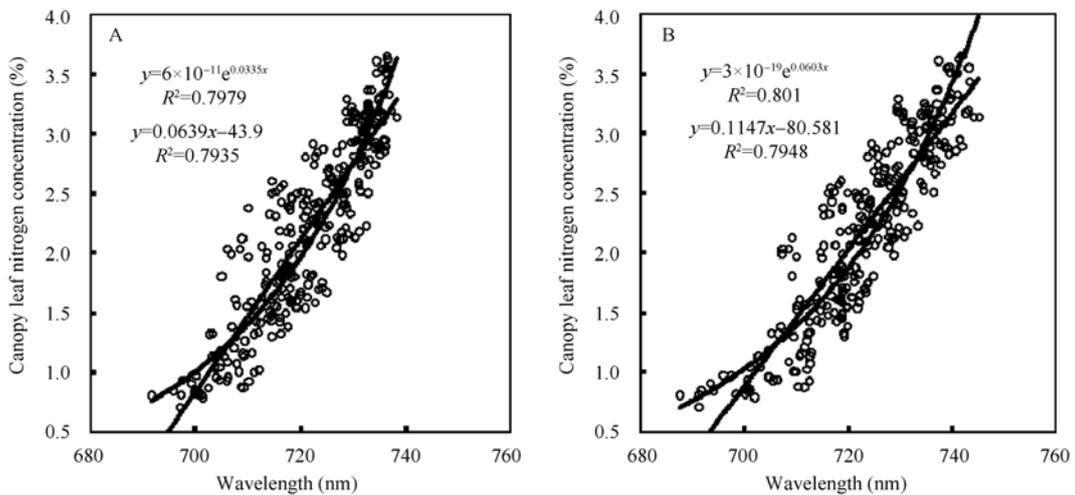


图 5 改进型线性外推红边位置(A)和线性方法红边位置(B)与水稻冠层叶片氮浓度的定量关系(n=291)

Fig. 5 Relationships between canopy leaf nitrogen concentration and REP based on adjusted linear extrapolation method (A) and linear four-point interpolation technique (B) (n=291)

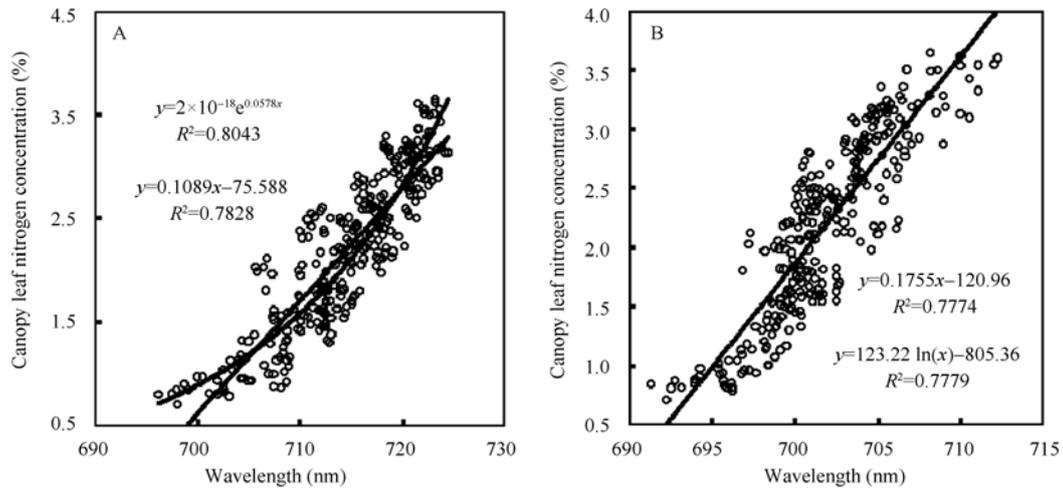


图 6 倒高斯模型红边位置(A)和拉格朗日红边位置(B)与水稻冠层叶片氮浓度的定量关系(n=291)

Fig. 6 Relationships between canopy leaf nitrogen concentration and REP based on inverted Gaussian fitting technique (A) and three-point Lagrangian interpolation (B) (n=291)

表 3 不同算法红边位置归一化处理后与水稻氮浓度的关系(n=291)

Table 3 Relationships between canopy leaf nitrogen concentration and normalized REP based on different approaches in rice (n=291)

红边位置算法 REP technique	模型形式 Model type	拟合模型 Fitting model	决定系数 R ²	预测标准误 SE
670~780 nm 范围一阶导数最大值 $\lambda_{\max}[D\lambda(i)]$	直线 Linear	$y = 0.6232x + 2.1622$	0.64	0.45
	曲线 Curve	$y = 2.0122e^{0.3382x}$	0.69	
线性插值红边位置 Linear four-point interpolation REP	直线 Linear	$y = 0.6688x + 1.9049$	0.79	0.34
	曲线 Curve	$y = 1.7592e^{0.3514x}$	0.80	
倒高斯模型红边位置 Inverted Gaussian REP	直线 Linear	$y = 0.6689x + 1.9192$	0.78	0.35
	曲线 Curve	$y = 1.7698e^{0.3548x}$	0.80	
拉格朗日算法红边位置 Lagrangian REP	直线 Linear	$y = -0.6679x + 3.9101$	0.78	0.35
	曲线 Curve	—	—	
线性外推法红边位置 Linear extrapolation REP	直线 Linear	$y = 0.7047x + 2.0108$	0.80	0.34
	曲线 Curve	$y = 1.8614e^{0.367x}$	0.79	
改进型线性外推法红边位置 Adjusted linear extrapolation REP	直线 Linear	$y = 0.701x + 2.004$	0.79	0.33
	曲线 Curve	$y = 1.8534e^{0.3679x}$	0.80	

表 4 基于不同算法红边位置的水稻冠层叶片氮浓度监测模型的检验结果 (n=251)

Table 4 Validation results of canopy leaf nitrogen concentration monitoring models based on different approaches in rice (n=251)

不同红边位置算法 REP technique	模型形式 Model type	决定系数 R ²	根均方差 RMSE (%)	相对误差 RE(%)
线性插值红边位置 Linear four-point interpolation REP	直线 Linear	0.72	10.53	4
	曲线 Curve	0.67	27.02	16
倒高斯模型红边位置 Inverted Gaussian REP	直线 Linear	0.71	10.76	5
	曲线 Curve	0.69	26.14	16
拉格朗日红边位置 Lagrangian REP	直线 Linear	0.70	13.16	4
	曲线 Curve	0.51	85.74	29
线性外推法红边位置 Linear extrapolation REP	直线 Linear	0.71	10.51	4
	曲线 Curve	0.66	24.52	15
改进型线性外推法红边位置 Adjusted linear extrapolation REP	直线 Linear	0.73	10.16	4
	曲线 Curve	0.70	24.47	15

1 1 图,可以直观展示两者对不同年份、不同品种和施氮水平的关系及水稻冠层叶片氮浓度的预测效果(图7)。

3 讨论

红边位置常随植被叶绿素含量升高发生红移现象^[11-12,16,24],因而被广泛用于植被叶绿素含量的定量监测^[13-14]。同时,植物叶绿素含量与氮状况密切相关^[25-26],因而红边位置也常被用于监测植被的氮含量^[27-28]。本文利用水稻冠层叶片的试验资料系统测试和比较了几种红边位置算法,发现经典的红边位置由于“三峰”现象而导致其对水稻氮浓度变化不太敏感,难以定量监测水稻氮素状况;而倒高斯模型、基于695、700和705 nm等3个波段的拉格朗日算法、线性内插及线性外推^[10,17,19,21]等方法构造的红边位置均随水稻氮浓度连续变化,可用于水稻氮浓度的定量监测。本文建模和模型测试资料包含几年的不同水稻品种、不同生育期资料,因此理论上监测模型适用于不同水稻品种和主要生育时期,但模型还需试验之外的资料进一步测试和完善。

水稻红边区域一阶导数光谱出现“三峰”现象,分别出现在700、720和730 nm附近,而红谷出现在675 nm附近。根据水稻冠层红光和红边区域一阶导数光谱的这些特点,对线性外推算法进行改进,将线性外推法的4个端点分别改为675 nm波段的X坐标轴点,755 nm波段的X坐标轴点,700 nm、730 nm波段的一阶导数点。因此,由675 nm波段的X

坐标轴点和700 nm波段的一阶导数点组成远红外线,由730 nm波段的一阶导数点和700 nm波段的X坐标轴点组成近红外线,两直线的交叉点对应的波长即为红边位置。这样简化的红边位置算法为 $(755 \times FD_{730} + 675 \times FD_{700}) / (FD_{730} + FD_{700})$,从而使原始算法要求的4个波段简化为2个波段。同时,因水稻冠层675 nm处一阶导数接近于0,所以端点可直接取其X坐标轴点,而取755 nm的X坐标轴点,避免了760 nm附近的光谱易受氧气吸收影响的缺点^[29-30]。改进算法后的红边位置好于原始线性外推法和其他算法红边位置与水稻氮浓度拟合度,表明这种算法更适合水稻作物的红边位置拟合和氮素状况的定量监测,本文对基于红边位置的水稻氮浓度监测模型的检验结果也证明了这一结论。

当某种植被红边区域的一阶导数光谱出现多峰时,拉格朗日算法红边位置会发生跳跃,产生不连续现象^[12,23],而本文有关水稻叶层的研究结果发现,红边区域一阶导数光谱出现“三峰”现象,因此,拉格朗日算法拟合的红边位置同样不连续。为使拉格朗日算法在水稻氮素监测上得到应用,本文以拉格朗日的基本算法为基础,分别以700、720和730 nm等3个波段为中心波长,左右分别以5 nm和10 nm的等距离或不等距离来确定另外2个波段,系统计算多个基于拉格朗日算法的红边位置,显示以695、700和705 nm等3个波段组合计算的拉格朗日红边位置与水稻冠层叶片氮浓度拟合程度和检验结果最好。因此,在水稻冠层上应用拉格朗日算法时,围绕红

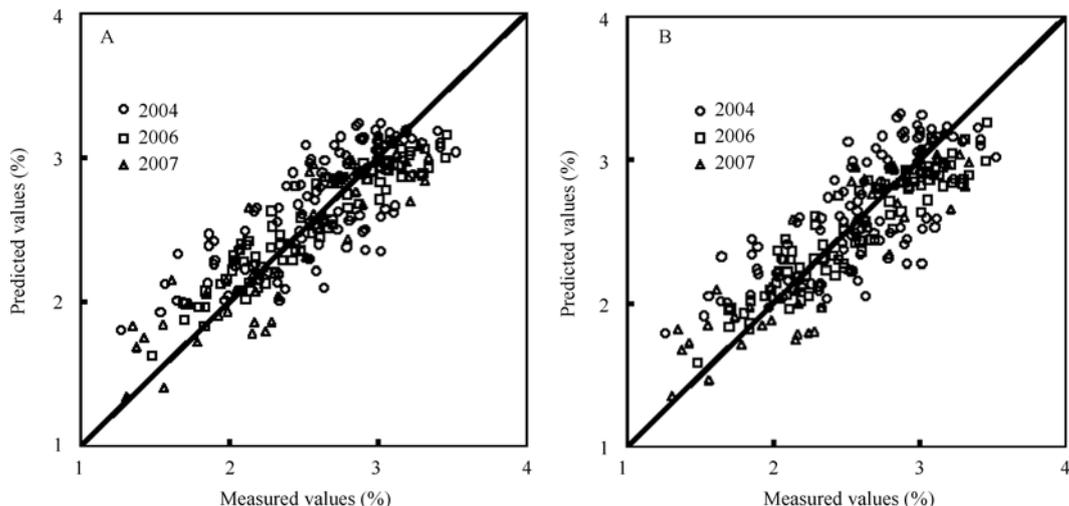


图7 基于改进型线性外推红边位置(A)和线性外推位置(B)水稻冠层叶片氮浓度监测模型的检验($n=251$)

Fig. 7 Comparison of measured and predicted canopy leaf nitrogen concentrations based on adjusted linear extrapolation method (A) and linear extrapolation method (B) ($n=251$)

边区第一主峰 700 nm 波段进行波段选择并确定红边位置, 可望获得成功。综合比较几种红边位置算法对水稻冠层叶片氮浓度预测效果, 参数获取的难易程度、应用要求的光谱类型等特点, 本研究认为改进型线性外推方法具有对波段信息要求少(仅需 700 nm 和 730 nm 附近 2 个波段的导数光谱信息)、计算简单等优点, 同时多年不同施氮水平和水稻品种的试验结果表现优于其他红边位置算法, 因此是最适合的水稻冠层光谱红边位置拟合方法。

4 结论

水稻红边区域光谱受施氮水平和品种影响较大, 导数光谱在红边区域的 700、720 和 730 nm 附近出现“三峰”现象。经典的红边位置不适合水稻氮素状况的定量监测。倒高斯模型、线性内插方法和线性外推法构造的红边位置随水稻氮浓度连续变化, 能用于水稻氮浓度的定量监测; 另外, 基于 695、700 和 705 nm 等 3 个波段的拉格朗日算法也可估测水稻冠层叶片氮浓度。改进型线性外推红边位置在获取难易度和监测精度上较其他几种算法有较明显优势, 是适合水稻叶层氮浓度估测的良好红边位置算法。

References

- [1] Woodard H J, Bly A. Relationship of nitrogen management to winter wheat yield and grain protein in South Dakota. *J Plant Nutr*, 1998, 21: 217–233
- [2] Zhang N Q, Wang M H, Wang N. Precision agriculture—A worldwide overview. *Comput Electron Agric*, 2002, 36: 113–132
- [3] Welsh J P, Wood G A, Godwin R J, Taylor J C, Earl R, Blackmore S, Knight S M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, part II: wheat. *Biosyst Eng*, 2003, 84: 495–511
- [4] Takebe M, Yoneyama T, Inada K, Murakami T. Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. *Plant Soil*, 1990, 122: 295–297
- [5] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E, Walter-Shea E A. Nitrogen deficiency detection using shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron J*, 1996, 88: 1–5
- [6] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens Environ*, 1989, 30: 271–278
- [7] Richardson A J, Everitt J H, Gausman H W. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of Alicia grass. *Remote Sens Environ*, 1983, 13: 179–184
- [8] Thomas J R, Gausman H W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agron J*, 1977, 69: 799–802
- [9] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Dai T B, Zhu Y. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agron J*, 2004, 96: 135–142
- [10] Bonham-Carter G F. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted Gaussian model to vegetation reflectance data. *Comput Geosci*, 1988, 14: 339–356
- [11] Gates D M, Keegan H J, Schleter J C, Weidner V R. Spectral properties of plants. *Appl Optics*, 1965, 4: 11–20
- [12] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int J Remote Sens*, 1983, 4: 273–288
- [13] Filella I, Peñuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Int J Remote Sens*, 1994, 15: 1459–1470
- [14] Wu C-S(吴长山), Xiang Y-Q(项月琴), Zheng L-F(郑兰芬). Estimating chlorophyll density of crop canopies using hyperspectral data. *J Remote Sens* (遥感学报), 2000, 4(3): 228–232 (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhao C-J(赵春江), Huang W-J(黄文江), Wang J-H(王纪华). Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(8): 980–987 (in Chinese with English abstract)
- [16] Collins W. Remote sensing of crop type and maturity. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1978, 44: 43–55
- [17] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance: An inverted-Gaussian reflectance model. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 1755–1773
- [18] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, Kuhbauch W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 1741–1753
- [19] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sens Environ*, 2006, 101: 181–193
- [20] Guyot G, Baret F, Jacquemoud S. Imaging spectroscopy for vegetation studies. In: *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Application*. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht), 1992. pp 145–165
- [21] Dawson T P, Curran P J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *Int J Remote Sens*, 1998, 19: 2133–2139
- [22] Nguyen H T, Lee B W. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *Eur J Agron*, 2006, 24: 349–356
- [23] Clevers J G P W, Jong S M D, Epema G F. Derivation of the red edge index using the MERIS standard band setting. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 3169–3184
- [24] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiol*, 1990, 7: 33–38
- [25] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 542–553
- [26] Haboudane D, Miller J R, Pattey E. Hyperspectral vegetation in-

- dices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sens Environ*, 2004, 90: 337–352
- [27] Lamb D W, Steyn-Ross M, Schaeres P. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: Modelling and experimental observations. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 3619–3648
- [28] Jongschaap R E E, Booij R. Spectral measurements at different spatial scales in potato: Relating leaf, plant and canopy nitrogen status. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2004, 5: 204–218
- [29] Guanter L, Richter R, Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features. *Appl Optics*, 2006, 45: 2360–2370
- [30] Schläpfer D, McCubbin I B, Kindel B. Wildfire smoke analysis using the 760 nm oxygen absorption feature. 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Warsaw, 2005. pp 1–10

欢迎订阅 2010 年《中国农业科学》中文版

《中国农业科学》中文版由农业部主管、中国农业科学院主办。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种；耕作栽培·生理生化；植物保护；土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境；园艺；贮藏·保鲜·加工；畜牧·兽医等栏目。读者对象是国内外农业科研院（所）、农业大专院校的科研、教学人员。

《中国农业科学》中文版影响因子、总被引频次连续多年位居全国农业科技期刊最前列或前列位次。1999 年起连续 8 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助；2001 年入选中国期刊方阵双高期刊；1999、2003、2005 年先后获“首届国家期刊奖”和“第二、三届全国国家期刊奖提名奖”；2004—2006 年连续荣获第四、五届全国农业优秀期刊特等奖；2001 年起连续获中信所“百种中国杰出学术期刊”称号；2008 年获中信所“精品科技期刊”称号及武汉大学中国科学评价中心“权威期刊”称号。在北京大学《中文核心期刊要目总览》（1992—2008 年版）中位居“农业综合类核心期刊表”首位。

2010 年 1 月起改为半月刊，每月 1、16 日出版，每期 224 页，定价 49.50 元，全年定价 1188.00 元，国内统一刊号：CN 11-1328/S，国际标准刊号：ISSN 0578-1752，邮发代号：2-138，国外代号：BM43。

地址：北京 中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部（邮编：100081）

电话：010-82109808, 82106279, 82106283, 82106282；传真：010-82106247

网址：<http://www.ChinaAgriSci.com>；E-mail: zgnykx@mail.caas.net.cn

欢迎订阅 2010 年《中国农业科学》英文版

《中国农业科学》英文版 *Agricultural Science in China* 由农业部主管、中国农业科学院主办。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种；耕作栽培·生理生化；植物保护；土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境；园艺；贮藏·保鲜·加工；畜牧·兽医等栏目。读者对象是国内外农业科研院（所）、农业大专院校的科研、教学人员。

本刊 2002 年创刊，2006 年获中国农学会第五届全国农业学术期刊金犁奖评比一等奖；2008 年 12 月获中信所“精品科技期刊”称号；位列国家新闻出版总署 2008 年期刊质量抽查前 10 名。

本刊 2006 年 1 月起正式与国际著名出版集团 Elsevier 合作，海外发行由 Elsevier 全面代理，全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2010 年 1 月起页码增至 160 页。每月 20 日出版，国内订价 36.00 元，全年 432.00 元，国内统一刊号：CN 11-4720/S，国际标准刊号：ISSN 1671-2927，邮发代号：2-851，国外代号：1591M。

地址：北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部（邮编：100081）

电话：82106279, 82106283, 82106282；传真：010-82106247

网址：<http://www.ChinaAgriSci.com>；E-mail: zgnykx@mail.caas.net.cn