

水稻冠层光谱反射特征及其与叶面积指数关系研究^①

吕雄杰¹ 潘剑君^{1*} 张佳宝²

(1 南京农业大学资源与环境学院 南京 210095; 2 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 在水稻试验小区,通过人为控制的方法造成施 N 水平的差异,对水稻整个生长期冠层光谱进行了比较系统、密集的测定,并测定了水稻几个重要生育期的叶面积指数。结果表明:随着施 N 水平的提高,水稻冠层光谱在各生育期呈现出一定的规律性,在近红外部分(760~1220 nm),冠层光谱反射率随着施 N 水平的提高而升高,而在可见光部分(460~710 nm),水稻冠层的光谱反射率反而逐渐降低。冠层光谱经差异显著性检验发现:水稻灌浆期以前,对施 N 水平最为敏感的波段是绿光(560~610 nm)和近红外(710~760 nm)部分;转换为归一化植被指数(NDVI)以后,差异最显著的是 $(R_{760} - R_{560}) / (R_{760} + R_{560})$ 。对叶面积指数与冠层光谱反射率的相关分析结果表明:在水稻抽穗期以前,叶面积与冠层光谱反射率相关性较差;而抽穗期以后,二者有较好的相关性。

关键词 水稻;冠层光谱反射;叶面积指数

中图分类号 S127

植物的反射光谱曲线具有显著的特征,施肥条件的不同会引起植物反射光谱曲线的变化^[1]。因此,可以利用这一特征,使用光谱仪测定植物在特定条件下的反射光谱,来研究植物的生长状况。N 素营养是作物赖以生长发育所必需的条件,也是植物需求量最大的矿质营养元素,对作物产量和品质影响最为显著,同时也是植物个体乃至自然生态系统和人工生态系统(包括农业系统)生长最常见的限制因子^[2~4]。水稻是我国的主要粮食作物之一,在我国农业和国民经济中起着很重要作用。我国是世界上 N 肥施用量最大的国家,施入农田的 N 肥量还将进一步增加^[5]。可是到目前为止对水稻 N 素营养状况还没有一个简便、快速、令人满意的田间诊断方法来指导科学施肥^[6]。过去对叶片中叶绿素含量与光谱的关系研究较多^[6~8],有研究表明,植物在可见光波段的反射率主要受叶绿素的影响^[9],而叶绿素含量和植株的 N 素含量密切相关(尤其是当植株缺 N 时),故常用叶绿素含量间接地指示植物的 N 素含量;也有研究发现 550 nm、675 nm 附近的反射率对叶绿素含量比较敏感^[9, 10]。但单一波段的反射率易受生物量、背景等的影响^[11]。研究还发现许多植物在缺 N 的情况下,无论是叶片还是植物冠层水平的可见光波段反射率都有所增加^[12, 13],对 N 含量变化最敏感

的波段在 530~560 nm 区域^[14],通过光谱测定及其变量的运算如 IR/R 比值,可以区分不同 N 素营养水平^[15]。许多学者通过各种统计方法来寻求含 N 量与光谱反射率或其演生量的关系,并建立模型来估算作物的 N 素含量。研究不同 N 素水平水稻生化成分与光谱反射率的关系,有可能为利用光谱方法诊断水稻 N 素营养状况开辟道路,对水稻进行大面积 N 素营养监测和长势监测具有一定的意义^[16]。因此通过不同施 N 水平处理的水稻小区试验,研究水稻冠层光谱特性及其与 N 肥施用量之间的关系,结合叶面积测定,并分析光谱数据与叶面积指数之间的相互关系,探讨一条通过冠层光谱来诊断水稻 N 素状况并监测水稻长势的途径,对于指导水稻的科学施 N 有重大的理论与现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验方法

水稻小区试验于 2002 年 6~10 月在上海市上海精准农业有限公司五四农场(E121°45', N30°53')内进行,水稻土类型为滨海相沉积物上发育的潞育型水稻土,质地中壤。供试水稻品种为 9734;共设 5 个 N 素处理水平,每一个处理重复 3 次,每个小区面积 5 m × 5 m,小区随机分布;各个小区的纯 N

^①由中国科学院知识创新工程重要方向项目 K2CX2-404 和“863”项目 2001AA245013 资助。

*通讯作者

施用量分别为 0、225、300、375、525 kg/hm²，分别用 N0（不施 N 肥，严重缺 N）、N1（低水平施 N，缺 N）、N2（中等水平施 N，N 营养水平正常）、N3（偏高施 N，N 过剩）、N4（高量施 N，N 严重过剩）表示。所有 N 肥（尿素、磷酸氢二铵、硝酸钾）分 1 次基肥、2 次苗肥和 2 次穗肥施入各个试验小区，施肥时间分别为 6 月 7 日、6 月 18 日、6 月 30 日、8 月 8 日、8 月 20 日。P 肥（磷酸氢二铵）和 K 肥（硝酸钾）的施肥水平按当地平均水平，田间管理

按大田管理方式进行。

1.2 水稻冠层光谱数据采集

水稻冠层光谱数据采集采用美国 CROPSCAN 公司研制的便携式多光谱辐射仪（Multispectral Radiometer MSR-16R），光谱范围 460~1650 nm，该仪器在 460~1220 nm 波长范围内性能稳定，各个波段的中心波长及带宽见表 1。在秧苗移栽后，每间隔 10 天左右测定 1 次水稻的冠层反射光谱，一直持续到收割。为了获得稳定的水稻冠层光谱反射率数

表 1 Cropsan 波段的中心波长和带宽

Table 1 Center wavelengths and band widths of Cropsan(MSR-16R)

波段	460	510	560	610	660	680	710	760
中心波长 (nm)	461.3	510.5	561.6	609.9	659.1	680.9	711.8	759.5
带宽 (nm)	8.3	8.1	8.5	10.0	10.8	11.3	9.2	9.8
波段	810	870	950	1100	1220	1480	1500	1650
中心波长 (nm)	810.1	871.6	951.0	1101.9	1222.8	1481.1	1500.9	1669.0
带宽 (nm)	10.7	12.5	11.0	16.3	11.5	13.5	13.2	195.0

据，测量选择在晴朗、无云、无风的天气进行，时间控制在北京时间 10:00~14:00 时之间，以保证有适当的太阳高度角和光照强度。测量前用标准板对仪器进行校准。测量时，传感器探头垂直向下，距冠层顶高度约 1m。每个小区选择 3 个具有代表性的点重复测量 2 次，然后取平均值代表该小区的光谱反射值。从 7 月 3 日到 10 月 5 日，由于光谱测定受到天气影响，共测得了 9 组光谱，覆盖了水稻的整个生育期。

1.3 叶面积指数(LAI)测定

水稻叶面积指数测量采用美国 LI-COR 公司生产的植冠分析仪 (LAI-2000 Canopy Analyzer)。由于不同的叶层深度，LAI 的数值有所不同，所以每次测量时都保持同一高度，这样有利于分析与比较不同观测点在不同观测时间取得的数据。每个小区选择 5 个有代表性的点，分别测定其叶面积指数，每个点重复测量 5 次，然后取平均值代表该小区水稻的 LAI。从 8 月 5 日到 10 月 5 日，共测得了 6 组叶面积数据，覆盖了水稻的重要生育期。

2 结果与分析

2.1 不同施 N 水平处理下，水稻冠层光谱反射随生育期的变化规律

在水稻生长发育过程中，不同的生长阶段，其生物量、叶面积指数以及对地面的覆盖程度等都会发生变化，因而其反射光谱特性也会发生变化^[17]。

不同 N 肥水平处理下，水稻在分蘖盛期，冠层光谱反射变化如图 1 所示。随着施 N 水平的提高，在近红外部分 760~1220 nm（图 1 b），冠层光谱反射率随着施 N 水平的提高而升高，而在可见光部分 460~710 nm（图 1 a），水稻冠层的光谱反射率反而逐渐降低，这与水稻的光谱特征有关。N 素营养水平高时，叶绿素含量高，光合作用强，可见光部分的吸收增强反射减弱；而对于近红外部分，叶面积的增大则促使反射率增大。其他生育期（如孕穗期、抽穗期和灌浆期）冠层光谱反射曲线的变化趋势大致相同。

2.2 冠层光谱差异显著性分析

为了能根据水稻冠层光谱反射数据来区分不同 N 肥处理，分别对分蘖盛期、孕穗期、抽穗期及灌浆期的光谱数据做了冠层光谱差异显著性分析检验，来检验两个相邻 N 素处理的差异性。检验中选择的是两样本的平均数差异的显著性检验法，即 T 检验。不同 N 素水平处理下的水稻冠层光谱的 T 检验结果见表 2。

综合水稻 4 个生长期的冠层光谱差异 T 检验结果可以看出，水稻灌浆期以前的几个生育期，易于区分 N 素施肥水平的波段都集中在绿光部分及近红外部分：560 nm、610 nm、710 nm、760 nm，而灌浆期以后，则不易区分。因此可以确定灌浆期以前，诊断水稻 N 素水平的冠层敏感波段为 560~610 nm 和 710~760 nm。

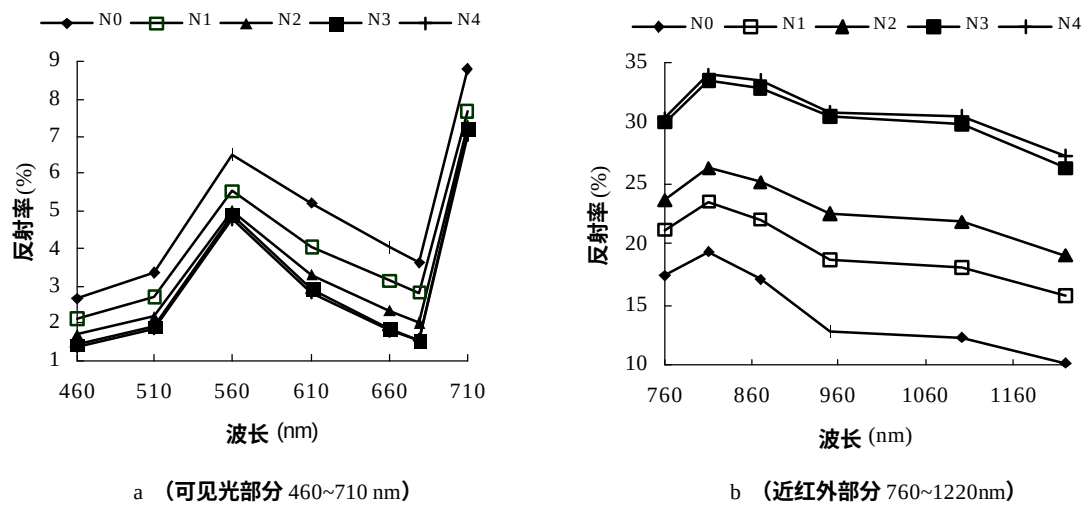


图 1 不同施 N 水平水稻冠层光谱反射率 (7 月 13 日, 分蘖盛期)

Fig. 1 Canopy spectral reflectance of rice treated with different nitrogen levels (Tillering stage)

表 2 不同施 N 水平水稻冠层光谱 T 检验结果

Table 2 T test results of canopy spectra of rice treated with different nitrogen levels

生育期	波长 (nm)	N0:N1			N1:N2			N2:N3			N3:N4		
		T 值	自由度	差异显著性	T 值	自由度	差异显著性	T 值	自由度	差异显著性	T 值	自由度	差异显著性
分蘖盛期	460	4.705	5	**	3.125	5	*	3.148	5	*	1.558	5	-
	510	3.791	5	*	5.633	5	**	3.949	5	*	1.037	5	-
	560	5.385	5	**	3.807	5	*	-1.044	5	*	3.052	5	*
	610	3.886	5	*	4.510	5	**	2.555	5	*	1.295	5	*
	660	3.272	5	*	5.044	5	**	4.741	5	**	1.261	5	-
	680	3.135	5	*	3.287	5	*	3.791	5	*	0.322	5	-
	710	7.637	5	**	2.938	5	*	-2.675	5	*	4.063	5	*
	760	-3.395	5	*	-1.916	5	*	-12.924	5	**	-0.955	5	*
	810	-3.527	5	*	-1.967	5	-	-11.637	5	**	-1.129	5	-
	870	-4.580	5	**	-2.103	5	-	-11.999	5	**	-1.169	5	-
孕穗期	950	-6.352	5	**	-2.393	5	-	-11.589	5	**	-0.989	5	-
	1100	-4.924	5	**	-2.261	5	-	-11.362	5	**	-1.042	5	-
	1220	-6.211	5	**	-2.100	5	-	-9.910	5	**	-0.838	5	-
	460	6.352	5	**	-1.808	5	-	10.448	5	**	-5.754	5	**
	510	5.724	5	**	0.844	5	-	13.207	5	**	-6.342	5	**
	560	5.100	5	**	4.223	5	**	1.292	5	*	-2.126	5	*
	610	5.029	5	**	2.998	5	*	3.963	5	*	-4.246	5	**
	660	5.655	5	**	2.087	5	-	8.174	5	**	-13.984	5	**
	680	4.985	5	**	-0.536	5	-	21.302	5	**	-16.918	5	**
	710	4.814	5	**	3.482	5	*	0.351	5	*	-1.161	5	*
	760	-16.644	5	**	-5.299	5	**	-2.713	5	*	4.840	5	**
	810	-73.065	5	**	-3.344	5	*	-2.151	5	-	8.613	5	**
	870	-37.274	5	**	-3.436	5	*	-1.881	5	-	17.671	5	**
	950	-45.720	5	**	-4.905	5	**	-1.207	5	-	16.920	5	**
	1100	-43.062	5	**	-6.985	5	**	-0.865	5	-	21.598	5	**
	1220	-10.906	5	**	-3.503	5	*	0.944	5	-	-19.011	5	**

续表 2

抽穗期	460	3.707	5	*	-0.172	5	-	1.441	5	-	-3.083	5	*
	510	5.441	5	**	4.648	5	-	4.648	5	**	-3.110	5	*
	560	6.450	5	**	4.003	5	*	3.383	5	*	-6.706	5	**
	610	5.150	5	**	3.143	5	*	3.042	5	*	-8.723	5	**
	660	6.109	5	**	2.444	5	-	2.245	5	-	-2.495	5	-
	680	8.699	5	**	0.743	5	-	3.304	5	*	-3.489	5	*
	710	9.651	5	**	3.657	5	*	3.701	5	*	-7.614	5	**
	760	-10.108	5	**	4.430	5	**	0.928	5	*	-5.236	5	**
	810	-18.809	5	**	3.998	5	*	0.252	5	-	-6.586	5	**
	870	-22.045	5	**	3.118	5	*	-0.104	5	-	-6.583	5	**
	950	-9.302	5	**	-1.177	5	-	0.979	5	-	-13.814	5	**
	1100	-21.415	5	**	-2.414	5	-	-0.190	5	-	-9.686	5	**
灌浆期	1220	-18.457	5	**	-0.239	5	-	1.696	5	-	-7.337	5	**
	460	0.691	5	-	-0.802	5	-	1.128	5	-	-1.189	5	-
	510	2.266	5	-	-0.232	5	-	2.536	5	-	-1.039	5	-
	560	5.544	5	**	1.252	5	-	2.450	5	-	-1.623	5	-
	610	1.016	5	-	-1.062	5	-	3.158	5	*	-0.620	5	-
	660	-0.400	5	-	-1.154	5	-	2.020	5	-	-0.111	5	-
	680	-1.037	5	-	-1.081	5	-	1.260	5	-	0.469	5	-
	710	4.611	5	**	1.007	5	-	1.881	5	-	-1.759	5	-
	760	-1.729	5	-	2.270	5	-	0.519	5	-	-3.039	5	*
	810	-2.524	5	-	0.080	5	-	0.351	5	-	-4.560	5	**
	870	-3.403	5	*	-1.773	5	-	0.216	5	-	-4.082	5	*
	950	-4.235	5	**	-1.716	5	-	0.295	5	-	-4.449	5	**
	1100	-4.573	5	*	-4.431	5	**	0.551	5	-	-3.879	5	*
	1220	-1.079	5	-	-3.290	5	*	0.837	5	-	-4.035	5	*

注：- 表示差异不显著；* 表示 0.05 水平的差异；** 表示 0.01 水平的差异。

2.3 植被指数差异性分析

植被指数作为一种经济、有效和实用的地表植被覆盖和长势的参考量，在一定程度上能够减少外界因素带来的数据误差。不同 N 素营养水平下的冠层光谱反射率存在着明显的差异，经植被指数转换后差异更为显著与稳定，利用冠层光谱测试可以区分作物的 N 素营养水平^[6]。本文选择应用较为广泛的归一化植被指数 (NDVI)，其数值是近红外波段与可见光波段数值之差与这两个波段数值之和的比值。通过以上的水稻冠层光谱反射差异显著性的分析，已经确定了诊断水稻冠层 N 素营养水平的敏感波段为 560~610 nm 和 710~760 nm。因此可以构建 4 个植被指数，分别是： $(R_{710}-R_{560})/(R_{710}+R_{560})$ 、 $(R_{710}-R_{610})/(R_{710}+R_{610})$ 、 $(R_{760}-R_{560})/(R_{760}+R_{560})$ 、 $(R_{760}-R_{610})/(R_{760}+R_{610})$ 。经过分析比较发现 4 个植被指数中 $(R_{760}-R_{560})/(R_{760}+R_{560})$ 表现最好，在水稻灌浆期以前，5 种不同施 N 水平下，该植被指数的差异最大（限于篇幅，植被指数差异显著性检验结果没有列出）。

2.4 不同施 N 水平下，水稻 LAI 随时间变化规律

图 2 是 5 个试验小区水稻 LAI 随生长期变化的曲线。从图 2 可以看出，不同 N 肥处理的水稻 LAI 变化曲线都大致呈抛物线型变化规律。在水稻生长的初期，LAI 近乎呈线性增长；由于水稻分蘖数量增加，促使 LAI 不断增加，LAI 增加的速率由快变慢，至抽穗期，LAI 达到最大值。到乳熟期以后，

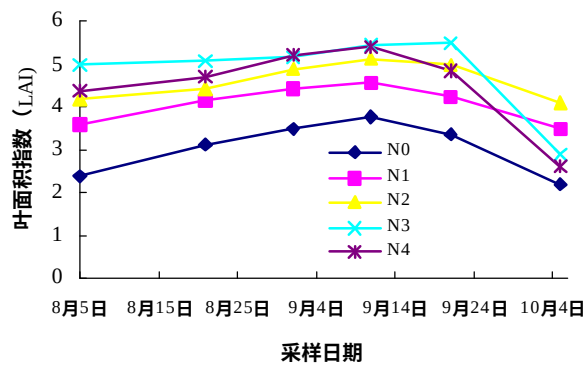


图 2 不同施 N 水平水稻 LAI 随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of LAI of rice treated with different nitrogen levels

由于叶片已经不能进行较强的光合作用,叶片不断将营养成分转移到穗部,并逐渐衰老,植株下部的叶片逐渐枯黄干死, LAI 变小;在水稻生长后期,生殖生长逐渐完成,作物叶片也逐渐脱落, LAI 值变得更小。由于 LAI 与地表的初级生产力密切相关,所以 LAI 能够反映作物的生长情况。从图 2 还可以看出,对于 N0、N1 及 N2 处理,随施 N 量的增加,同一时期测定的 LAI 依次增大。表明这 3 个处理中水稻随着施 N 水平的提高,长势越好;而 N3、N4 处理, LAI 变化曲线趋势大致与前 3 个处理一致,都呈抛物线型,但 LAI 随时间变化异常,这可能与施 N 过量有关。另外,从曲线的变化趋势看,中低水平施 N 肥 LAI 随时间的变化曲线比较平缓,而高水平施 N 肥 LAI 曲线则变化相对比较剧烈。

2.5 水稻叶面积指数与冠层光谱反射率的相关分析

不同植物的反射光谱波形是相同的,主要的区

别在反射率的大小上^[6]。可见光波段是叶子健康状况最灵敏的标志,指示着植物光合作用能否正常进行。可见光波段能被植物叶绿素强烈吸收,进行光合作用制造干物质,它是光合作用的代表性波段^[18]。已有研究表明,不是所有波段的太阳辐射能都能对作物的光合作用起促进作用,仅 400~700 nm 波段的光有效辐射部分对作物光合作用起重要作用,并且不同波段的辐射能分别影响作物的不同生理过程^[19, 20]。叶片在可见光波段(400~700 nm)的反射率较低,透射率也很低,这是因为大部分入射光能被叶绿素、叶黄素、胡萝卜素、花青素等色素吸收进行光合作用,吸收的波段主要集中在以 450 nm 为中心的蓝波段及以 670 nm 为中心的红波段,大约在 550 nm 黄绿波段处有个反射峰^[21]。因此本研究选择光谱仪的可见光部分 460~680 nm 波段光谱反射率,与水稻 LAI 进行相关分析,分析结果见表 3。

表 3 水稻 LAI 与冠层光谱反射率的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between LAI and canopy spectral reflectance of rice

波长 (nm)	N0		N1		N2		N3		N4	
	抽穗前	抽穗后	抽穗前	抽穗后	抽穗前	抽穗后	抽穗前	抽穗后	抽穗前	抽穗后
460	-0.508	-0.999*	-0.595	-0.977*	-0.338	-0.971*	-0.242	-0.956*	0.475	-0.998*
510	-0.718	-0.941*	-0.739	-0.977*	-0.571	-0.999*	-0.498	-0.982*	0.637	-0.992*
560	-0.741	-0.996*	-0.807	-0.999*	-0.663	-0.916*	-0.558	-0.864*	0.612	-0.910*
610	-0.561	-0.995*	-0.611	-0.999*	-0.417	-0.973*	-0.302	-0.935*	0.563	-0.995*
660	-0.543	-0.998*	-0.554	-0.999*	-0.337	-0.980*	-0.155	-0.946*	0.427	-0.994*
680	-0.398	-0.973*	-0.376	-0.985*	-0.134	-0.998*	0.168	-0.984*	0.420	-0.992*

注:* 表示通过 0.05 显著性检验。

表 3 数据表明:5 个处理中,抽穗前叶面积与冠层光谱的相关性较差,但在反射峰(550 nm)附近的 510 nm 及 560 nm 波段的相关系数都大于可见光部分的其他波段(460 nm、610 nm、660 nm、680 nm);抽穗后,叶面积与冠层光谱都有 >0.8 的负相关关系。笔者认为这与水稻冠层光谱特性有关。水稻冠层光谱是水稻光谱与背景光谱综合作用的结果,在水稻播种的初期,水稻冠层光谱主要反映的是背景(水和土壤)的光谱特征,随着水稻的生长发育,背景光谱作用逐渐下降,水稻光谱作用逐渐增强,到抽穗期前后,水稻光谱特性作用达到最大,而背景光谱作用减至最小,随着水稻的衰老,背景的光谱作用又逐渐增强。一般叶面积指数达到 3 左右时,冠层在可见光和中红外波段的光谱反射率基本稳定^[6]。水稻到抽穗期, LAI 达到最大值,此时冠层

光谱较好地反映了水稻的光谱特征,背景光谱作用较小,因而叶面积与冠层光谱的相关性较好。

2.6 存在的问题以及可能的对策

在小区试验中,通过人为造成施 N 水平的不同,可导致水稻 LAI、叶色和叶片生化成分的显著差异,这必然导致不同 N 素营养水平水稻的冠层光谱产生差异;另一方面,随着水稻生育进程的推进,水稻植株大小、盖度、冠层结构、地上生物量和叶片生化成分含量发生变化,这也将导致其冠层光谱的变化^[16]。因此影响水稻冠层光谱的因素是很复杂的。本试验在严格控制施 N 量而保持其他条件一致的情况下研究冠层光谱,但生育期的变化会对光谱造成一定的影响。另外,本试验研究的水稻品种是 9734,试验结果能否推而广之应用于其他水稻品种尚需要试验来进一步验证。为了深入研究 N 素水平

差异与水稻冠层光谱响应的机理，有必要对多水稻品种进行多年试验研究。

3 结 语

随着施 N 水平的提高，水稻的冠层光谱反射，在各个生长发育期呈现出一定的规律性。选择诊断水稻 N 素营养水平的敏感波段 560~610 nm 和 710~760 nm，由光谱反射率数据构建归一化植被指数可以使差异更为显著，可以确定水稻 N 素的丰缺状况，从而为水稻的精确施肥提供科学依据，减少过量施 N 给环境造成的污染，提高资源的利用效率和农业生产经济效益。另外，叶面积指数是农业遥感研究中作物长势监测评价的重要参数，是农作物个体特征和群体特征相关的综合指数，通过测定水稻叶面积指数可以掌握水稻的生长状况，为监测水稻长势提供依据。通过叶面积指数与冠层光谱的相关分析，可以根据抽穗期以后水稻的冠层光谱，判断水稻的生长状况。由此可见，由光谱反射构建植被指数，并结合叶面积测定来监测水稻的长势，进而指导科学施肥是可行的。

致谢：特别感谢中国科学院地理科学与资源研究所和上海精准农业有限公司提供水稻试验小区。

参考文献

- 1 申广荣, 王人潮. 植被光谱遥感数据的研究现状及其展望. 浙江大学学报, 2001, 27(6): 682 ~ 690
- 2 赵炳梓, 徐富安, 周刘宗, 徐梦熊. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率. 土壤, 2003, 35(2): 122 ~ 125
- 3 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究. 生态科学, 1998, (12): 34 ~ 42
- 4 Li Jumei, Li Shengxiu. Relation of mineralizable N to organic N components in dark Loessial soils. Pedosphere, 2003, 13 (3): 279 ~ 288
- 5 邱慧珍. 长效氮肥一次基施对覆膜冬小麦的肥效研究. 土壤学报, 2003, 40 (5): 454 ~ 456
- 6 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性. 国土资源遥感, 1999, (1): 9 ~ 14
- 7 吴长山, 月琴, 兰芬, 庆禧. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. 遥感学报, 2000, 4 (3): 228 ~ 232
- 8 刘伟东, 月琴, 兰芬, 庆禧, 吴长山. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析. 遥感学报, 2000, 4 (4): 279 ~ 283
- 9 Thomas JR, Gausman HW. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. Agronomy Journal, 1977, 69: 799 ~ 802
- 10 Filella I, Serrano L, Serra J, Peñuelas J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discrimination analysis. Crop Science, 1995, 35: 1400 ~ 1405
- 11 Munden R, Curran PJ, Catt JA. The Relationship between the Red Edge and chlorophyll concentration in the Broadbalk winter wheat experiment at Rothamsted. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15: 705 ~ 709
- 12 Wang Ke, Shen Zhangquan, Wang Renchao. Effects of Nitrogen Nutrition on the Spectral Reflectance Characteristics of Rice Leaf and Canopy. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1998, 24: 93 ~ 97
- 13 Blackmer TM, Scheper JS, Varvel GE, Walter-shea EA. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies. Agronomy Journal, 1996, 88: 1 ~ 5
- 14 Blackmer TM, Scheper JS, Varvel GE. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn levels. Agronomy Journal, 1994, 86: 934 ~ 938
- 15 Arne Jensen, Bent Lorenzen. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barely grown at different nitrogen levels. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11 (10): 1809 ~ 1820
- 16 唐延林, 王人潮, 王秀珍, 李云梅. 水稻叶面积指数和叶片生化成分的光谱法研究. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, (1): 4 ~ 7
- 17 沈掌泉, 王珂, 王人潮. 水稻冠层光谱反射特性的动态变化研究. 国土资源遥感, 1996, (4): 40 ~ 44
- 18 彭斌, 张树文. 基于 NDVI 与 LAI 的水稻生长状况研究. 遥感技术与应用, 2002, 17(1): 12 ~ 16
- 19 欧阳海. 农业气候学. 北京: 气象出版社, 1990, 124 ~ 128
- 20 卢其尧译, 蒙特思, 江广恒主编. 植被与大气—原理. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1985: 1 ~ 60
- 21 陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1992, 10

水平。有研究表明, PBC^K 值与盆栽耗竭作物的累积吸 K 量呈显著正相关^[6]。本研究中, 二者的相关系数也达 0.7452, 接近显著水平。 PBC^K 值与土壤 K 释放试验的非交换性 K 累积释放量的相关性也接近显著水平 ($r = 0.7347$), 表明 PBC^K 值的大小可用来评价土壤长期的供 K 潜力。

3 小 结

本试验结果表明, 不同母质发育的水稻土 K 素的 Q/I 特性差别很大。三角洲沉积物发育的水稻土 PBC^K 值在 5 种供试土壤中是最大的, 表明其供 K 潜力最大, 这是由于水云母的大量存在, 在土壤中形成了一个很大的 K 库所致; 而其 $-\Delta K^0$ 值较高, 表明这种土壤具有较高的交换性 K 含量。然而三角洲沉积物发育的水稻土, 其交换性 K 含量并不是很高 (142.5mg/kg), 这主要是因为该土壤的单位面积产量高, 作物吸收带走大量土壤 K 素, 并且长期施 K 肥很少, 致使土壤 K 素得不到补充所致。在今后的生产中, 该土壤应注意适当施用 K 肥, 以防土壤 K 肥力进一步下降。花岗岩发育的水稻土 $-\Delta K^0$ 值和 ARe^K 值在 5 种供试土壤中都是最高的, 而 PBC^K 值却很低, 这表明该土壤交换性 K 水平和有效度较高, 但 K 素缓冲能力很差, 因此在该土壤上如不施或少施 K 肥, 则极易引起土壤 K 素营养的恶化和作物减

产, 但一次大量施 K, 又易于发生淋失, 造成 K 的浪费, 因此应当薄施勤施。石灰岩和玄武岩发育水稻土的粘土矿物中含有较多的水云母、蛭石等固 K 的粘土矿物, 所以其固 K 能力强, 从而导致其 ARe^K 值很小, $-\Delta K^0$ 值在 5 种供试土壤中最小, PBC^K 值中等, 说明其供 K 强度很小, K 素缓冲能力一般。在这两种土壤上施用 K 肥, 只有在先满足 K 固定的需要后, 才能显出肥效。

参考文献

- 1 Beckett PHT. Studies on soil potassium I. Confirmation of the ratio law measurement of potassium potential. J. Soil Sci., 1964, 15: 1~8
- 2 Beckett PHT. Studies on soil potassium II. The "immediate" Q/I relations of labile potassium in the soil. J. Soil Sci., 1964, 15: 9~23
- 3 胡全才, 卢朝东, Syers J K. 我国不同土壤 Q/I 特性及其供钾能力研究. 山西农业科学, 2000, 28 (1): 35 ~ 39
- 4 广东土壤普查办公室主编. 广东土壤. 北京: 科学出版社, 1993, 475 ~ 477, 508 ~ 528
- 5 朱永官, 罗家贤. 我国南方一些土壤的钾素 Q/I 特性. 热带亚热带土壤科学, 1993, 2 (2): 75~80.
- 6 李国富, 李华兴, 简放陵, 黄小红, 周荣昌. 广东不同质地水稻土 Q/I 特性与钾肥施用技术的关系的研究. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4 (1): 36 ~ 40

(上接第 653 页)

RICE CANOPY SPECTRAL REFLECTANCE AND LEAF AREA INDEX

LV Xiong-jie¹ PAN Jian-jun¹ ZHANG Jia-bao²

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract Canopy spectra of plots of rice field treated with different nitrogen levels were periodically and continually measured during the whole growing period and LAI of the crop at several important growing stages was also determined. The results showed that despite different growing stages, rice canopy spectral reflectance changed regularly when the nitrogen fertilizer application rate increased. With the application rate of nitrogen fertilizer increasing, the canopy spectral reflectance increased at 710~1220nm, but decreased at 460~680nm. The variation of the canopy spectral reflectance at different nitrogen levels were analyzed and compared. The results showed that the canopy spectral reflectance was sensitive to nitrogen levels in 560~610nm and 710~760nm before milking. After transforming canopy spectral reflectance into normalized difference vegetation index (NDVI), $(R_{760}-R_{560})/(R_{760}+R_{560})$ was significantly different at different nitrogen levels. In addition, the correlation coefficient between LAI and canopy spectral reflectance was low before the heading period, however, was high after the heading period.

Key words Rice, Canopy spectral reflectance, Leaf area index