

文章编号: 1007-4619 (2004)04-0309-08

# 冬小麦冠层氮素的垂直分布及光谱响应

王纪华, 王之杰, 黄文江, 马智宏, 刘良云, 赵春江

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

**摘要:** 考察了田间条件下冬小麦主要生育阶段冠层氮素、叶绿素的垂直分布及其光谱响应。不同叶层的叶片含氮量按上(冠层顶部向下至1/3株高处)、中、下层的顺序呈明显下降的梯度, 全生育期不同土壤施氮处理平均, 上、中层间相差13.3%, 中、下层间相差29.5%。在生育前期, 各层叶片的含氮量随土壤供氮水平增高而增加, 但不同叶层间氮素的梯度相对稳定。到生育中后期, 中、下层叶片间氮素含量梯度增大, 且随土壤供氮水平增高而加剧, 最大时可相差45.3%; 冠层内叶绿素(a+b)含量的垂直分布规律与氮素含量的垂直分布相类似, 但对土壤供氮水平的反应上表现出与氮素不尽一致的趋势。不同叶层的光谱特征表现为, 在土壤低氮水平下, 不同叶层间在红光波段、短波红外波段(1400nm—1800nm及1950nm—2300nm)的反射率差异显著, 下部叶层的反射率显著高于上、中叶层, 但在土壤高氮水平下, 上述差异消失; 在近红外平台处, 不同叶层间反射率按上、中、下顺序降低, 梯度分布特征明显。利用近红外波段的冠层反射光谱能够很好地反演中下层叶片的叶绿素含量。

**关键词:** 冬小麦; 氮素; 垂直分布; 反射光谱

**中图分类号:** TP79/S15 **文献标识码:** A

## 1 引言

冬小麦是北方主要旱田作物, 氮素是直接反映其营养状况及代谢的重要组分, 因而也是长势监测、营养诊断乃至品质评价的重要指标。利用遥感手段大面积、无破坏和及时获取冬小麦冠层氮素信息作为施肥决策和品质评价的依据, 其经济和生态效益的潜力巨大。20世纪80年代末, 国外利用遥感估测干叶片蛋白质、淀粉、木质素等组分的含量同利用实验室常规分析方法获得的结果已十分相近<sup>[1,2]</sup>。近年来, 国内也开展了对生长植株冠层氮素的定量遥感研究<sup>[3,4]</sup>。

从迄今已有的研究报道看, 作物冠层氮素的定量遥感反演主要存在两方面的不足: 一是在利用叶绿素反演值间接推算氮素含量时, 往往忽视在植物生长发育的不同阶段, 由于叶片面积及含水状况的不同而产生的叶绿素与氮素测定值的非同步消长<sup>[4]</sup>, 进而影响模型普适性的现象; 二是在根据冠层光谱数据直接反演氮素含量时, 对冠层氮素含量垂直分布差异的影响估计不足, 特别是在氮素胁迫条

件下, 顶层叶片与下层叶片受胁迫及衰老的非同步性影响利用光谱数据对整个冠层氮素水平的反演。这些已成为进一步提高模型精度和改善应用效果的限制因子。本文从建立遥感与农学链接模型的需求出发, 考察了冬小麦主要生长阶段的叶绿素与氮素消长规律, 并对冬小麦田间冠层氮素含量垂直分布及其光谱响应进行了定量分析, 以期建立更加适用的遥感模型提供依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计

试验于2001—2002年在北京市昌平区小汤山精准农业实验基地进行, 供试地块土壤为潮土, 0—20cm土层内养分含量为有机质1.45%, 全氮0.091%, 碱解氮63.4mg/kg, 有效磷37.7mg/kg, 速效钾123.4mg/kg。供试品种为北京地区推广面积较大的籽粒高蛋白型品种“中优9507”和普通籽粒蛋白型品种“京冬8”。试验设4个施肥处理: 0N: 不施氮; 1N: 施纯氮150kg/hm<sup>2</sup>; 2N: 施纯氮300kg/hm<sup>2</sup>;

收稿日期: 2002-12-30; 修订日期: 2003-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(G20000779)和北京市科委项目(H010710010123)资助。

作者简介: 王纪华(1958—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要从事遥感的农业应用和作物生理生化研究。

3N: 施纯氮 450kg/hm<sup>2</sup>, 水管理按常规进行。每处理 3 次重复取平均值。

## 2.2 测定方法

### 2.2.1 LAI 及投影 LAI 的测定

采用赵春江等的面元分解法<sup>[9]</sup>, 调查单位面积内茎数, 再取其中的部分单茎, 根据叶片的弯曲样式, 每片叶定 3—4 个“拐点”, 将叶片划分成 4—5 个梯形即“面元”, 测量各拐点相对高度及拐点间的距离, 经自制软件运行计算出各叶层 LAI 和垂直投影 LAI。

### 2.2.2 光合有效辐射测量

采用 LI-191SA 型线状光合有效辐射计测量各叶层底部的光合有效辐射 (PAR), 则 1 层的光合有效辐射表示日光穿透 1 层叶层到达 1 层底部的光合有效辐射; 2 层的光合有效辐射表示日光穿透 1 层+2 层叶层到达 2 层底部的光合有效辐射; 依次类推。各层光合有效辐射 (PAR) 以该层底部 PAR 与冠顶 PAR 之比的相对值表示

### 2.2.3 光谱反射率测定

采用美国 ASD 公司产 FieldSpec 光谱仪进行测定。测定条件为视场角 25°, 波段范围为 350nm—2500nm, 光谱分辨率在 700nm 时为 3nm, 在 1400nm 及 2100nm 时为 10nm, 选择晴朗、无风天气, 在北京时间 10:30—14:00 进行。测定时距任一顶部 50cm 处垂直测定, 地面可见视野范围约为 0.43m 直径 (面积 0.17m<sup>2</sup>) 的圆, 在 1m<sup>2</sup> 范围内均匀改变测点共测 20 次 (各处理测定前、后立即测定参考板校正), 去除最大值和最小值后取平均值作为该层群体的光谱反射率值。

### 2.2.4 按叶层的分层方法

根据冬小麦生育时期株高差异将冠层平均分为 3—4 层, 并自顶部向地表分别命名为 1、2、3、4 层, 本文中拔节期分为 3 层, 开花期和灌浆期分为 4 层 (图 1)。测定完光谱反射率后, 用园艺剪分别剪下各层植株体, 分开茎叶测定生化组分。

### 2.2.5 生化组分测定

按叶位的测定方法: 各叶位将测完光谱的 5 枚

叶片伞中部 0.5cm 宽剪碎后混匀供测定叶绿素 a+b 总量 (可见分光光度计法)。同步取周围同类叶片 20 片烘干后粉碎混匀供测定全氮含量 (凯氏定氮法)。按叶层的测定方法: 以光谱测定点为中心选各层 1m 直径范围内代表性叶片 20 片, 取中部 0.5cm 宽剪碎后混匀供试叶绿素 a+b 总量, 其余烘干后粉碎混匀供试全氮含量。

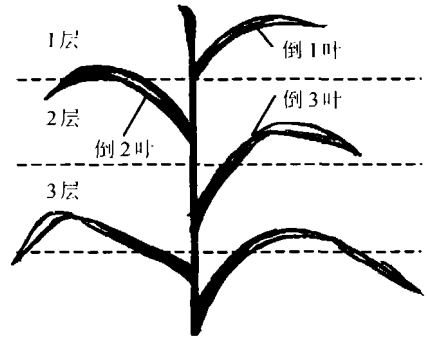


图 1 冠层分层示意

Fig. 1 The sketch map of different layer in canopy and the leaf position in canopy

## 3 结果与分析

### 3.1 冠层光合有效辐射的垂直分布

冠层内光合有效辐射 (PAR) 的垂直分布, 带来了植物“光营养”的差异, 因而也是造成生化组分差异的主要原因。如表 1 所示, 随着冠层深度以算术级数增加, 冠层内 PAR 呈几何级数减少, 并且, 增加施肥量会加大梯度, 这在生育前期尤为明显, 表明增施氮肥虽然可使植株体内氮素总量增加, 但同时使到达中 (穿过 1+2 层)、下 (穿过 1+2+3 层) 部冠层的光合有效辐射量降低, 恶化了中、下部的光环境。从不同小麦品种间的比较看, “京冬 8”较“中优 9507”耐肥性差, 即前者在高肥力下, 群体中、下部的光环境恶化更为严重。

表 1 冠层光合有效辐射 (PAR) 的垂直分布

单位: 相对值 (%)

Table 1 The vertical distribution of photosynthesis active radiation (PAR) in canopy

Unit: relative value (%)

叶层	京冬 8				中优 9507			
	拔节期		灌浆期		拔节期		灌浆期	
	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N
1	32.8	29.5	44.2	45.4	29.9	27.3	55.0	49.2
1+2	19.4	5.6	20.8	19.3	20.6	10.7	26.7	23.3
1+2+3	13.0	3.6	14.1	11.6	11.6	7.0	16.9	13.7

### 3.2 冠层叶面积指数的垂直分布

冠层内的光分布主要受群体叶面积及其倾角大小的影响,上面提到的冠层光合有效辐射( $PAR$ )垂直分布特点,实质上是由冠层垂直投影的  $LAI$  的差异所决定的。如表2所示,拔节期冠层内  $LAI$  较多地分布在上层(表2中的叶层“1+2+3”与叶层“2+3”的差值)和中层(表2中的叶层“2+3”与叶层“3”的差值),上、中层间差距较小,而下层(3层)的  $LAI$  分布远低于中、上层。并且,由于叶片倾角的田间分布趋于优化,使得投影  $LAI$  的垂直梯度差距明显小于  $LAI$  的垂直梯度差距。以两个品种平均值计,拔

节期的  $LAI$ ,上层比中层高 23.7%;中层比下层高 241.5%;而拔节期的投影  $LAI$ ,上层比中层低 4.5%;中层比下层高 91.0%,两品种的分布规律趋于一致。进一步分析可知,上层叶片较中下层叶片倾角大,偏于上举,因而投影  $LAI$  值减小。

在灌浆期,由于穗及穗下节间的存在,使上层  $LAI$  显著低于中、下层,而中、下层之间相差较少。从不同小麦品种间的比较看,“京冬8”中层与下层  $LAI$  的比例为 1:0.88;“中优9507”为 1:1.21。可见后者的  $LAI$  偏小且相对下移,使中下层透光状况有所改善,这与表1的结果相吻合。

表2 冠层叶面积指数( $LAI$ )的垂直分布

Table 2 The vertical distribution of leaf area index ( $LAI$ ) in canopy

叶层	分项	京冬8				中优9507			
		拔节期		灌浆期		拔节期		灌浆期	
		0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N
1+2+3	$LAI$	3.320	3.501	3.091	3.266	3.630	3.760	1.942	2.420
	投影 $LAI$	1.293	1.362	1.776	1.878	1.899	1.967	1.205	1.502
	$LAI$	1.524	1.607	2.677	2.828	2.029	2.102	1.692	2.109
2+3	投影 $LAI$	0.706	0.744	1.440	1.523	1.257	1.302	1.002	1.249
	$LAI$	0.236	0.249	1.254	1.325	0.570	0.590	0.927	1.155
3	投影 $LAI$	0.145	0.153	0.521	0.551	0.530	0.549	0.462	0.575

### 3.3 冠层叶片氮素含量的垂直分布

不同叶层的叶片含氮量按上、中、下层的顺序呈明显下降的梯度(表3)。从对土壤施氮的反应看:在生育前期的拔节期,土壤施氮水平的提高,相应增加了各层次叶片的含氮量,但未改变不同叶层间的梯度水平;而在生育中期的开花期,土壤施氮水平的提高对高蛋白品种上、中层叶片含氮量增加作用轻微,对普通低蛋白型品种几乎没有作用;到了生育后期,土壤高氮处理的下层叶片含氮量甚至低于同层土壤低氮处理,即诱发了后期的早衰,这与表1分析中提到的“增施氮肥虽然可使植株体内氮素总量增加,但同时使到达中、下部冠层的光合有效辐射量降低,恶化了中、下部的光环境”的结果相吻合。表明在常规施氮量条件下,即使是较充足的施肥处理,其不同层次叶片间的氮素营养竞争也普遍存在。

由表3看出,低蛋白型品种“京冬8”在灌浆期,土壤低氮水平(0N处理)上、中层叶片间氮素含量相差17.4%,中、下层叶片间氮素含量相差16.8%;土

壤高氮水平(2N处理)上、中层叶片间氮素含量相差15.7%,中、下层叶片间氮素含量相差45.3%。高蛋白型品种“中优9507”也呈类似趋势。表明由于氮素的极易运转特性,在生育中后期,下层叶片中的氮素向上层幼嫩叶片中转移,补充的氮素主要集中运往上层叶片,使上、中层叶片间氮素含量梯度变小,而中、下层叶片间氮素含量梯度进一步增大。

从表3还可看出氮素胁迫(0N处理与2N处理比较)对各层叶片氮素含量的影响:下层>中层>上层。在拔节期和开花期,0N处理比2N处理氮素含量全层平均低10%左右,其中下层平均低16.2%。到了灌浆期,由于穗部籽粒库的强大调运能力,各层(包括顶层)叶片中的氮素也开始向外输出,使土壤供氮能力的影响减弱,甚至出现下层叶片0N处理比2N处理氮素含量高的现象。可见中、下层叶片较早地反映了受胁迫程度,但由于中、下层叶片对光谱的贡献率较小,在利用遥感监测冠层氮素时,须通过适宜波段的选择及分层模型的构建,捕捉到中、下层叶片的受胁迫状况,才能为施肥决策提供更及时有效的信息。

表 3 冠层叶片氮素含量随叶层的垂直分布

单位: 干重(%)

Table 3 Vertical distribution of leaf total nitrogen according to leaf layer in canopy

Unit: 10mg N/g dried weight(%)

叶层	京冬 8						中优 9507					
	拔节期		开花期		灌浆期		拔节期		开花期		灌浆期	
	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N
1	4.54	5.02	5.10	5.33	4.25	4.86	4.92	5.27	5.25	5.51	4.69	5.03
2	3.95	4.52	4.70	4.73	3.62	4.20	4.00	4.49	4.55	5.19	4.35	4.44
3	2.89	3.53	3.50	4.70	3.10	2.89	3.18	3.47	3.48	3.99	3.14	2.87

### 3.4 冠层叶片叶绿素含量的垂直分布

冠层叶片叶绿素(a+b)含量的垂直分布规律与氮素含量的垂直分布相类似,即不同叶层的叶绿素含量从上至下逐层下降。全生育期不同土壤施氮处理平均,上、中层间相差 18.5%,中、下层间相差 14.3%(表 4)。但对土壤施氮的反应却与氮素不尽相同,增加氮肥用量可使全生育期内中、下层叶片间叶绿素含

量梯度减小。

从氮素胁迫(0N 处理与 2N 处理比较)对各层叶片叶绿素含量的影响看,程度明显轻于对氮素的影响,以 2 个品种平均值计,下层叶片高氮处理叶绿素含量较低氮处理高 13.8%,而中层叶片高氮处理叶绿素含量只高于低氮处理 1.4%;这可能与测试时叶片含水量差异的干扰以及氮素与叶绿素非同步性变化有关。

表 4 冠层叶片叶绿素(a+b)含量的垂直分布

单位: mg/g 鲜重

Table 4 The vertical distribution of leaf Chl(a+b) content according to leaf layer in canopy

Unit: mg Chl/g fresh weight

叶层	京冬 8						中优 9507					
	拔节期		开花期		灌浆期		拔节期		开花期		灌浆期	
	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N	0N	2N
1	2.57	2.82	3.24	3.94	3.39	3.59	2.48	2.26	3.14	3.79	3.53	3.70
2	2.38	2.41	3.30	3.10	3.27	2.46	2.25	1.95	2.22	3.37	2.69	3.04
3	1.78	1.83	3.25	2.72	2.90	2.44	1.69	1.90	2.16	3.22	1.49	2.99

### 3.5 冠层内不同叶层生化组分的光谱响应

小麦冠层光谱是在田间条件下测得的混合光谱,除了土壤因素外,各处理间混合光谱的差异主要受冠层内不同层次叶片对反射光谱的贡献大小以及不同层次叶片生化组分的垂直分布差异的影响。开花期地表植物覆盖与裸露土壤比例为 9:1 左右,土壤干扰较小<sup>[6]</sup> 又是大面积获取品质信息的关键时期<sup>[7]</sup>。为此,以开花期为例探讨冠层内不同叶层生化组分的光谱响应。

#### 3.5.1 不同叶层的“分层光谱”响应

从开花期不同叶层的“分层光谱”特征上看,两品种均表现为在土壤低氮水平下,不同叶层间在可见光区域(尤其是红光波段)、短波红外区域的 1400nm—1800nm 及 1950nm—2300nm 波段的反射率差异显著,其中下部叶层的反射率显著高于上、中叶

层,但在土壤高氮水平下,上述差异消失。分析其原因,在土壤低氮水平下,植株各层叶面积及叶片含氮量均下降,尤以下层显著,因此表现出在可见光区反射率升高,但导致短波红外区反射率升高的原因,是否与土壤 N 低有关尚不清楚;在近红外平台处,不同叶层间反射率按上、中、下顺序降低,梯度分布特征明显,而土壤供氮水平影响较小(图 2)。

#### 3.5.2 不同叶层生化组分与冠层光谱的相关

为了进一步分析不同层次叶片生化组分的垂直分布差异对冠层光谱的影响,将不同层次氮素(或叶绿素)含量进行多种组合:(1)第 1 层(上层);(2)第 2 层(中层);(3)第 3 层(下层);(4)(1+2+3)层/3;(5)按冠层 PAR 垂直分布匹配权重;(6)第 1 层/(1+2+3)层;(7)第 2 层/(1+2+3)层;(8)第 3 层/(1+2+3)层;(9)(2+3)层/(1+2+3)层,并分别与冠层光谱进行相关分析。

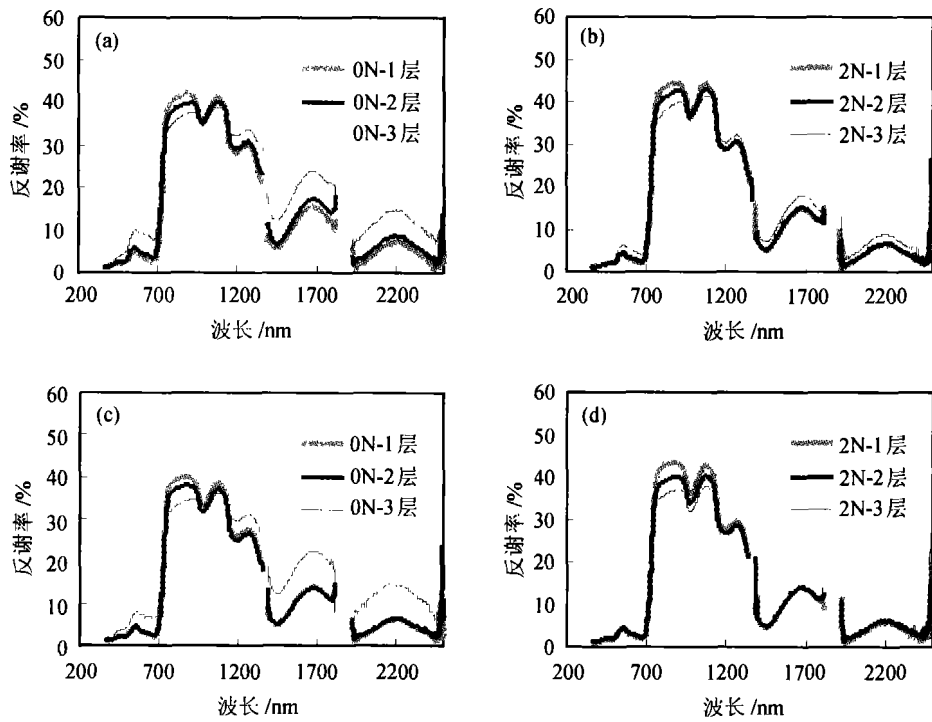


图 2 开花期冠层内不同叶层的光谱响应

Fig. 2 The spectral response of leaf at different layer in canopy at anthesis

(a) “京冬 8” 品种 0N 处理; (b) “京冬 8” 品种 2N 处理; (c) “中优 9507” 品种 0N 处理; (d) “中优 9507” 品种 2N 处理

如图 3 图 4 所示, 在开花期小麦冠层不同叶层生化组分的不同组合与 350nm—1750nm 反射光谱间的相关, 总体上表现出在相关波段数量上叶绿素(a+b) 多于氮素, 在相关程度上叶绿素(a+b)高于氮素的趋势。

一般认为, 在可见光区域由于叶绿素在蓝紫光 and 红光的强吸收, 使得该区域的反射率随叶绿素含量的增加而降低。由于蛋白质是叶绿体的结构基础, 一般占叶绿体干重的 30%—45%, 因此氮素在大多数情况下呈现与叶绿素相近的特征。由图 3 可见, 氮素与冠层光谱之间, 模式 3、4 在 550nm—

730nm 的负相关及模式 7 在 400nm—500nm 的正相关达到显著水平。初步分析认为, 冠层反射率随整个冠层的氮素平均值尤其是第 3 层(下层) 的氮素含量的增加而降低; 相反, 随着第 2 层(中层) 氮素含量占全屏总氮量比例的增加而升高。由于可见光对叶片的“穿透”能力较弱, 下层叶片在可见光区的反射光谱, 可能主要来源于视场内不同角度的间隙。由于氮素的易运转特性, 不同土壤供氮水平间上层叶片含氮量相差相对较小, 加之高氮素含量水平下光谱响应的敏感度下降, 因此相关不显著。

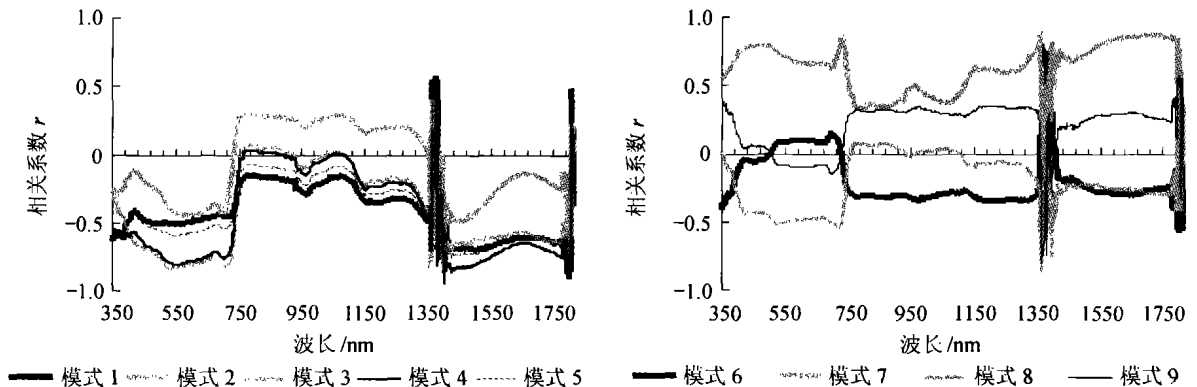


图 3 开花期不同叶层氮素与冠层光谱的相关

Fig. 3 The correlation between leaf total nitrogen content at different layer and canopy spectrum at anthesis

注: 模式 1 为第 1 层氮素含量与冠层光谱的相关(下同); 模式 2 为第 2 层; 模式 3 为第 3 层; 模式 4 为(1+2+3)层的平均; 模式 5 为按 PAR 权重匹配; 模式 6 为第 1 层/(1+2+3)层; 模式 7 为第 2 层/(1+2+3)层; 模式 8 为第 3 层/(1+2+3)层; 模式 9 为(2+3)层/(1+2+3)层

由图 4 可见, 叶绿素与冠层光谱之间, 在可见光区域模式 5、模式 1 在 550nm—650nm 的负相关及模式 8 在 350nm—450nm 的正相关达到显著水平。表明冠层反射率随上层叶片叶绿素含量或按冠层 PAR 垂直分布匹配权重(上层占主导地位)的叶绿素含量增加而降低; 相反, 随着第 3 层(下层)叶绿素含量占全层总叶绿素量比例的增加而升高, 而第 2 层(中层)相关不显著。分析其原因, 冠层中各层氮素含量不仅在垂直分布上呈现明显的梯度规律, 并

且上、中、下 3 个层次随土壤供氮水平的变化规律在不同品种间也表现一致, 而叶绿素含量随土壤供氮水平的变化只在上层表现出与氮素相似的趋势, 下层叶片叶绿素含量随土壤供氮水平的变化因品种而异, 但两品种平均仍表现为高氮处理高于低氮处理 13.8%, 而中层叶片叶绿素含量, 高、低氮间仅相差 1.4%, 这可能是中层叶片叶绿素含量与冠层光谱间相关不显著的原因。

在近红外波段 750nm—1350nm 处, 不同层次的

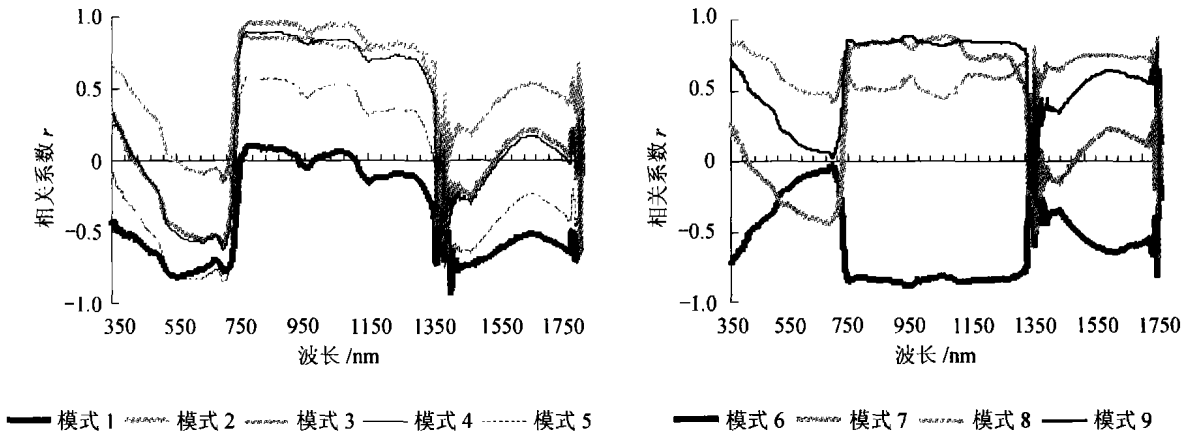


图 4 开花期不同叶层叶绿素与冠层光谱的相关

Fig. 4 The correlation between leaf Chl(a+b) content at different layer and canopy spectrum at anthesis

氮素组合与光谱反射率相关较弱(图 3), 但叶绿素相关较强(图 4), 尤其在 750nm—1150nm 处相关显著, 其中模式 2、模式 3、模式 4、模式 7、模式 9 的正相关达到显著水平, 模式 6 的负相关达到显著水平, 表明利用近红外波段的冠层反射光谱能够很好地反演中下层叶片的叶绿素含量。初步分析, 这包括四个方面的原因, 首先, 上层叶片的叶绿素含量的差异较小, 而中下层叶片的叶绿素等生化组分差异较大; 其次, 叶片在近红外波段的透过率较高, 通常大于 40%, 而在其它波段的透过率, 不超过 10%, 所以该波段的冠层光谱更能反映中下层叶片的光学及生化属性; 第三, 叶片在近红外波段的光谱反射率较高, 通常大于 40%, 所以中下层叶片在该波段有较强的反射光谱信息被探测; 第四, 叶片在近红外波段的光谱反射率是叶片生命力的最敏感波段, 对于中下层叶片, 叶绿素含量越高, 生长越旺盛, 则叶片在近红外波段的光谱反射率也越高。

不同层次的氮素组合与光谱反射率之间, 模式 7 在 1550nm—1750nm 处达到显著正相关, 模式 4 在 1350nm—1550nm 处达到显著负相关(图 3)。不同层次的叶绿素组合与光谱反射率之间, 模式 8 在 1550nm—1750nm 处达到

显著正相关; 模式 1 在 1350nm—1450nm 处达到显著负相关, 模式 6 在 1650nm—1750nm 处达到显著负相关(图 4)。表明在 1350nm—1750nm 区域, 总的趋势是冠层反射率随上层叶片氮素、叶绿素绝对量或上层占全层比例的增加而降低; 相反, 随着中、下层氮素、叶绿素绝对量的增加而升高。

## 4 讨 论

定量遥感精度的提高, 需要从传感器、传输模型以及目标物的精确描述等多方面挖掘潜力。由于在精准农业应用上更多地关心作物的生化组分, 因此把着眼点放在了生化组分随冠层高度的垂直分布及其光谱响应上。探讨生化组分尤其是氮素随冠层高度的垂直分布及其光谱响应的实践意义在于, 由于氮素的易运转特性, 缺氮时老叶中的氮素会向新叶中转移, 作物缺氮的显著特征是植株下部叶片首先褪绿黄化, 然后逐渐向上部叶片扩展<sup>[13]</sup>。在缺肥初期即轻度氮素胁迫时, 下层叶片因缺氮而引起早衰; 在持续缺肥即中度胁迫时, 中下层叶片均明显衰老, 田间条件下肉眼可见中下层叶片由深绿变浅绿或变

黄,但此时上层叶片很少发生变化。因此,生产上迫切需要拔节期对中下层叶片氮素或叶绿素状况的监测来指导适时和适量施肥,而遥感获取的冠层反射光谱信息中上层叶片的光谱贡献率较大,中下层叶片信息量不足。为此,需要通过进一步深入的分层光谱分析,以及采用多角度研究方法等途径,以提高对作物冠层中、下部生育状况的诊断精度。

对于植被空间结构与光学遥感模型的构建,已有系统的研究<sup>[8]</sup>。本文强调“垂直分布”问题对于定量遥感反演作物冠层生化组分的重要性,主要是考虑与传感器及传输模型相比,目标物的精确描述尚有很大的潜力没有挖掘。虽然在作物栽培学中对于生化组分沿叶层平面梯度的“垂直分布”尚未见系统的报道,但大量有关不同叶位叶片营养与功能的研究表明,不同叶位间叶绿素及氮素的垂直分布规律及梯度大小受到作物种类、生育时期及土壤供氮能力的影响。小麦、水稻及棉花等作物,不同叶位叶片叶绿素含量可相差1倍以上<sup>[9-11]</sup>。通过建立农学模型与相应的遥感模型链接,无疑会提高遥感反演的精度和实际应用的价值。本文有关冠层生化组分与光谱响应的分层研究方法和氮素沿冠层垂直分布的研究结果尚未见报道,是一个值得探索的课题,但本研究采用的供试品种较少,还需要增加品种数量以得出更普适性的结论。

由于氮素与叶绿素测试结果表示方法的不同,氮素含量用单位干重,而叶绿素含量用单位鲜重表示,以及二者随生育期变化的差异,使得氮素与叶绿素的垂直分布规律尤其是在不同土壤施氮水平下的反应不尽相同,因此在进行遥感反演时二者不可任意相互替代。本研究表明利用近红外大多数波段的冠层反射光谱反演中下层叶片的叶绿素含量可能获得较高的精度,而对氮素的反演需要从可见光波段或短波红外波段中筛选。

对于目标物的描述,应当筛选对变化率贡献权重大的、已有较多先验知识积累、容易划分且无须适时(可通过事前或事后调查)获取的几个主要因子,并将它们作为非遥感参数组合到模型中去,或者建立农学模型链接到遥感模型中去。在利用遥感方法反演小麦、水稻、玉米等禾谷类作物的生化组分时,建议选取株形(分为叶片上举、平展和中间型)、籽粒关键生化组分类型(小麦、饲用玉米可分为高蛋白、低蛋白和中间型;水稻可依据氮素和淀粉综合特性分类)和生化组分垂直分布(分为上、中、下层或更多

层)3个主要因子。

## 参考文献(References)

- [1] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating com leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**: 229—239.
- [2] Jacquemound S, Verlebout J, Schmuck G. Investigation of leaf biochemistry by statistics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **54**: 180—188.
- [3] Wang X Z, et al. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2001, **27**(3): 301—306. [王秀珍, 王人潮, 李云梅等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, **27**(3): 301—306.]
- [4] Zhao C J, Huang W J, Wang J H, et al. The Red Edge Parameters of Different Wheat Varieties Under Different Fertilization and Irrigation Treatments [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **7**: 745—751.
- [5] Zhao C J, Wang J H, Huang W J, et al. Study on the Simulation Models of Canopy Structure Parameters in Winter Wheat, [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(Supp): 76—83.
- [6] Wang J H, Huang W J, Zhao C J, et al. Estimation of leaf biochemical components and kernel quality index of winter wheat from spectral reflectance, [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(Supp): 84—92.
- [7] Wang J H, Huang W J, Zhao C J, et al. Studies on the testing standardization of the agricultural parameters for the application of remote sensing [J]. 2000, *High Technology Letters* **10**: 91—95. [王纪华, 黄文江, 赵春江等. 遥感地面农学参数测试规范化初探[J]. 高技术通讯, 2000, **10**(supp): 91—95.]
- [8] Li X W, Wang J D. The vegetation optical remote sensing models and the structures parameters [M]. Science Press, 1995, 14—15. [李小红, 王锦地著. 植被光学遥感模型与植被结构参数化[M]. 科学出版社, 北京, 1995, 14—15.]
- [9] Zuo B Y, Duan J C. On the ultrastructure and function of chloroplasts from the winter wheat leaves at different ranks of attachment to the main stem [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1978, **20**(3): 223—228. [左宝玉, 段续川. 冬小麦不同层次叶片中叶绿体超微结构及其功能的研究[J]. 植物学报, 1978, **20**(3): 223—228.]
- [10] Zhou Q F, Wang J H. Comparison of upper leaf and lower leaf of rice plants in response to supplemental nitrogen levels. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, **26**(3): 607—617.
- [11] Fan J H, Liu M. Changes of leaf chlorophyll content and specific leaf weight in different nodes of sea island cotton during its growth period [J]. *Talimu Agriculture University Sinica*, 1999, **11**(2): 1—6. [范君华, 刘明. 海岛棉生育期中各节位叶片叶绿素含量和比叶重的变化, 塔里木农垦大学学报[J], 1999, **11**(2): 1—6.]
- [12] Lu J L. *Plant Nutrition (M)*. Beijing Agriculture University Press, Beijing, 1994, p. 26. [陆景陵主编. 植物营养学(上册)(M), 北京农业大学出版社, 北京, 1994, p. 26.]

## The Vertical Distribution Characteristic and Spectral Response of Canopy Nitrogen in Different Layer of Winter Wheat

WANG Ji-hua, WANG Zhi-jie, HUANG Wen-jiang, MA Zhi-hong, LIU Liang-yun, ZHAO Chun-jiang  
(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The precision of quantificational remote sensing can be enhanced by tapping the potential of sensor, transfer model and exact describing of the object. We think exactly of describing the object is the base of enhancing inversion precision of remote sensing. For this purpose, the vertical distribution of canopy nitrogen and Chl (a+b) status in winter wheat were studied. The spectral response of nitrogen and Chl(a+b) at different layer in canopy also had been analyzed. There appeared an apparent descending trend of nitrogen content from the upper layer to the lower layer. The nitrogen content of upper layer was higher than that of the middle layer with 13.3% and 29.5% between the middle layer and the lower layer in the growth duration. At early stage, the nitrogen content gradually increased with the increasing of the nitrogen application. But there were stable nitrogen gradient between different layers. There appeared greater nitrogen content gradient at middle and latter growth stage and the gradient sharpening with the nitrogen application amount. The vertical distribution property of Chl(a+b) concentration was similar to that of the nitrogen. But there were greater gradient of Chl(a+b) concentration than that of nitrogen content between upper and middle layer and less between middle and lower layer. The amount of nitrogen application decreased the Chl(a+b) gradient between middle and lower layer, which differ from that of nitrogen. Under the lower nitrogen condition, there existed significant reflectance difference among different layer at the red wavebands, the wavebands from 1400nm to 1800nm and from 1950nm to 2300nm. The reflectance of lower layer was significantly higher than that of upper and middle layer. But there was almost no difference among different layer with affluent nitrogen application. There was apparent gradient distribution in different layer and appeared gradually decreased from upper to lower layer at near-infrared platform. But the amount of nitrogen application didn't affect the gradient distribution characteristics of spectral reflectance. Besides, the correlative coefficients between canopy spectra and foliar biochemical contents of different layers were analyzed. The canopy spectral reflectance in different bands for remote sensing of foliar biochemical contents in different layers were found, and the spectral reflectance is significant correlative with foliar Chl(a+b) content of middle and lower layers. Future work should involve giving more attention on the method for multi-angle analyzing and establishing inversion model.

**Key words** winter wheat; nitrogen content; vertical distribution; spectrum