

不同施氮处理下滴灌甜菜冠层的高光谱响应

李宗飞¹, 陈兵², 苏继霞¹, 费聪¹, 李阳阳¹,
刘宁宁¹, 唐利华¹, 周红亮¹, 耿青云³, 樊华¹

(1.石河子大学农学院,新疆 石河子 832003;2.新疆农垦科学院棉花研究所,新疆 石河子 832003;
3.塔城地区农业技术推广中心,新疆 塔城 834700)

摘要:为明确甜菜冠层高光谱特性,对不同氮素处理下滴灌甜菜冠层反射光谱以及叶面积指数(LAI)、叶绿素含量与叶片全氮含量进行分析。结果表明:甜菜冠层光谱反射率随着施氮量的增加而升高,与氮素运筹模式10:0相比,氮素运筹模式7:3的冠层光谱反射率和冠层光谱“红边”在叶丛快速生长期较低,在糖分积累期较高。甜菜冠层光谱红边具有“双峰”现象,且“双峰”随生育时期的推进逐渐减弱,随施氮量的增加,愈加凸显。光谱变量与叶片全氮含量显著相关,红边幅值 $D_{\lambda_{red}}$ 、红边峰值面积 S_{red} 、红边位置 λ_{red} 与LAI、叶绿素含量显著相关,表明通过高光谱反演滴灌甜菜农学参数进行氮素营养状态诊断是可行的。

关键词:施氮水平;甜菜;滴灌;冠层高光谱响应;红边参数

中图分类号:S127;S566.3 **文献标志码:**A

Hyperspectral response of sugar beet to nitrogen fertilizer treatments in drip irrigation

LI Zong-fei¹, CHEN Bing², SU Ji-xia¹, FEI Cong¹, LI Yang-yang¹,
LIU Ning-ning¹, TANG Li-hua¹, ZHOU Hong-liang¹, GENG Qing-yun³, FAN Hua¹

(1.Agronomy College, Shihezi University, Shihezi 832003, China;
2. Cotton Institute of Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
3. Tacheng Agricultural Technology Extension Center, Tacheng 834700, Xinjiang, China)

Abstract: In order to better understand the hyperspectral characteristics of sugar beet canopy, the canopy reflectance spectrum and the total nitrogen content of the leaves were determined in a field experiment. The leaf area index (LAI) and chlorophyll content, the hyperspectral characteristics of sugar beet under different nitrogen fertilizer treatments were studied. Meanwhile, the correlation between the red edge parameters of the canopy and its spectral variables, and the total nitrogen content, LAI, and chlorophyll content were analyzed. The results showed that the spectral values of sugar beet were significant different among different growth stages, especially, in near infrared range (700~1 300 nm). The spectral reflectance of canopy under different nitrogen application rates were also significant different. In the rapid growth period of leaf cluster and increased with increasing nitrogen application rates. Conopy reflectance and “red edge” of nitrogen management model 7:3 were lower than nitrogen management 10:0 in the leaves rapid growth period, but higher in the sugar accumulation period. The red edge of beet canopy spectrum had a Twin-peak phenomenon, but the Twin-peak phenomenon gradually weakened with the growth and this change became more apparent with increasing nitrogen application rate. A significant correlation between the spectral variables and total nitrogen content of the leaves was observed. Additionally, the red edge ampli-

收稿日期:2017-09-10

修回日期:2018-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31660360,31771720);新疆生产建设兵团博士基金项目(2014BB012);石河子大学国际科技合作推进计划(GJHZ201706);新疆自治区研究生科研创新项目(XJGR12016039)

作者简介:李宗飞(1993),男,新疆库尔勒人,硕士研究生,研究方向为作物生理生态。E-mail:shzulizongfei@163.com

通信作者:樊华(1983),女,新疆石河子人,副教授,博士,主要从事作物生理生态方面研究。E-mail:fanhua@shzu.edu.cn

tude $D_{\lambda_{red}}$, the red edge area S_{red} , and the red edge position λ_{red} , significantly correlated with LAI, and chlorophyll. Therefore, it is possible to diagnose nitrogen nutrition status of sugar beets by using hyperspectral variables of its canopy under drip irrigation.

Keywords: nitrogen treatment; beet; drip irrigation; canopy hyperspectral response; red edge parameter

氮素是影响作物生长发育以及产量形成的重要营养物质。施氮量不足,难以保证作物产量品质,施氮量过多,可能造成农田污染。因此,如何根据作物生长发育状况及时判断适宜施氮量,是实现作物精准施肥的必要环节。遥感作为一种无损监测技术,通过建立冠层反射光谱与地上生物量、叶面积指数、叶绿素含量之间的关系,为实时快速获取农学参数及营养诊断提供支持^[1-3]。“红边”是由于红光波段强烈吸收和近红外波段强烈反射造成的,是描述植物色素状态和健康状况的重要指示波段^[4-5],与作物叶绿素含量、生物量以及氮素营养密切相关^[6-7]。

有关高光谱遥感监测作物长势的研究表明,可以用植被指数 RVI(810,510)、DVI(810,560)作为反演小麦 LAI 的光谱参数^[8]。利用高光谱 RVI 可以定量反演棉花地上各组分的干物质积累量^[9]。由 760、810、870、950 等构成的各类植被指数以及红边面积、红边幅值与玉米干物质积累有较好相关性,并且可以利用红边位置来估测叶绿素含量^[10]。植被指数 NDVI(R573,R440)建立的估测方程可以监测小麦氮素营养状况^[11],植被指数 SR(R553,R537)可以较好地在水稻叶片氮素含量进行估测^[12]。杨荣超等^[13]筛选了 NDVI、SDr/SDy、CCI 和 SDb 四种光谱指数分别用来估测甜菜不同生育时期 SPAD 值。尽管前人利用光谱变量估测作物农学参数方面已经开展了大量的研究,但在甜菜上涉及不多。甜菜是我国北方主要糖料作物,新疆是我国重要的糖料基地,近年新疆滴灌甜菜生产中出现了单产 $87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的全国高产纪录^[14],但相关氮素光谱监测特征尚不明确。为此,本文以滴灌甜菜为研究对象,明确不同施氮水平和氮素运筹模式下甜菜冠层的高光谱特征及其与甜菜农学参数的关系,以期对滴灌甜菜长势监测和氮肥精准管理提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年 4 月至 2016 年 11 月在新疆石河子大学农学院试验站($44^{\circ}31'N$, $88^{\circ}06'E$)进行。试验区域耕层土壤为灌溉灰漠土,有机质含量 $13.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 7.3,全氮含量 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷

$22.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $157.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验共设置 4 个施氮水平: $N0(0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N75(75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N150(150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $N225(225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。施氮比例按照运筹模式(M1,10:0)、运筹模式(M2,7:3)两种模式,即分别在甜菜叶丛快速生长期和块根膨大期按 M1、M2 所示比例施入氮肥。试验采用随机区组设计,重复 3 次,供试甜菜品种为 Beta356,播种日期为 4 月 15 日,试验田内设置 24 个小区,小区面积 24 m^2 ,甜菜播种行距 50 cm,株距 20 cm。基肥为尿素 $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,重过磷酸钙 $319.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,硫酸钾 $206 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其它按照大田统一管理。

1.2 测试项目及方法

1.2.1 高光谱数据采集 在甜菜叶丛快速生长期、块根膨大期、糖分积累期,选择晴朗无云天气,于当地时间北京时间 12:00–15:00,采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的 FileSpecPro FR2500 型背挂式野外高光谱辐射仪测定甜菜植株冠层高光谱反射率。该光谱仪波段范围为 $350 \sim 2500 \text{ nm}$,采样间隔为 1 nm,光谱仪视场角 25° ,测量时探头垂直向下,距离冠层垂直高度约 0.5 m,各小区在测量前均进行白板校正。每小区测量 4 次,取平均值作为该小区的光谱反射率值。

1.2.2 农学参数采集 农学参数取样时间与冠层高光谱反射率测量同步。每个小区在光谱测定区域取代表性植株 3 株,破坏性取样。叶面积指数测定(LAI):采用 LI-3100 进行叶面积的测定,通过单位面积群体数据,换算成 LAI。叶绿素含量的测定:选取植株对应光谱叶片,用无水乙醇、丙酮混合液(1:1)浸提叶片 24 h,在分光光度计下进行比色测定。叶片全氮含量测定:采用凯氏定氮法,经消煮定容的试样碱化蒸馏,经 H_3BO_3 吸收后,利用硫酸标准溶液滴定并计算。产量测定:在收获期对各处理未取样小区实收,拔出块根后去除青头,及时称量各小区鲜重。

1.2.3 光谱分析 采用光谱归一化微分分析技术,对反射光谱进行一阶微分(差分),从一阶微分光谱数值中提取红边位置 λ_{red} (红光范围 680~760 nm 内反射光谱一阶导数最大值所对应的波长)、红边幅值(即红边斜率 $D_{\lambda_{red}}$,红光范围 680~760 nm 内一阶

导数光谱的最大值)与红边峰值面积(即红边面积 S_{red} ,680~760 nm 之间的一阶导数光谱所包围的面积)来描述光谱红边特征。

1.2.4 数据分析 采用 EXCEL 2013 进行基础农学数据的输入,用 ViewSpecPro 进行基础光谱数据的处理,采用 MATLAB 软件提取甜菜冠层光谱数据的特征参数,采用 SPSS 12.0 分析软件进行农学参数与光谱特征参数之间的相关分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理甜菜农学参数特征

各施氮处理甜菜冠层 LAI 和冠层叶片叶绿素含量均随着生育时期的推进呈现单峰曲线,叶片全氮含量则表现先下降后稳定的趋势(图 1)。不同施氮量之间甜菜冠层 LAI、冠层叶片叶绿素含量和叶片全氮含量在叶丛快速生长期均基本表现为 N225 处理最高。氮素运筹模式对甜菜生育后期叶片农学参数影响显著,与 M1 相比,M2 氮素运筹模式显著

提高了糖分积累期 N150 处理的 LAI、叶片叶绿素含量和叶片全氮含量。表明块根膨大期少量施氮能够提高糖分积累期甜菜叶片农学参数,维持甜菜生育后期对光合产物的需求,有利于块根糖分的累积。随着施氮量的增加,块根产量呈现上升趋势(图 2),两种运筹模式均在 N225 达到最高值,但在氮素运筹模式 M1 与 M2 之间差异较小。

2.2 不同施氮处理下甜菜冠层高光谱反射率

以甜菜叶丛快速生长期为例,不同施氮处理下甜菜冠层高光谱反射率变化较大(图 3a,b),甜菜冠层光谱反射率随着施氮量的增加在可见光波段(400~700 nm)基本无变化,在近红外波段(700~1 300 nm)逐渐增加,其中 N75、N150 与 N225 处理的冠层高光谱反射率分别比 N0 处理提高了 0.9%~9%、0.5%~24%与 0.3%~37%。

两种氮素运筹模式下甜菜冠层反射光谱的形状随生育期的推进变化趋势相同,但各生育时期冠层高光谱反射率略有差异(图 3 c,d),其中可见光

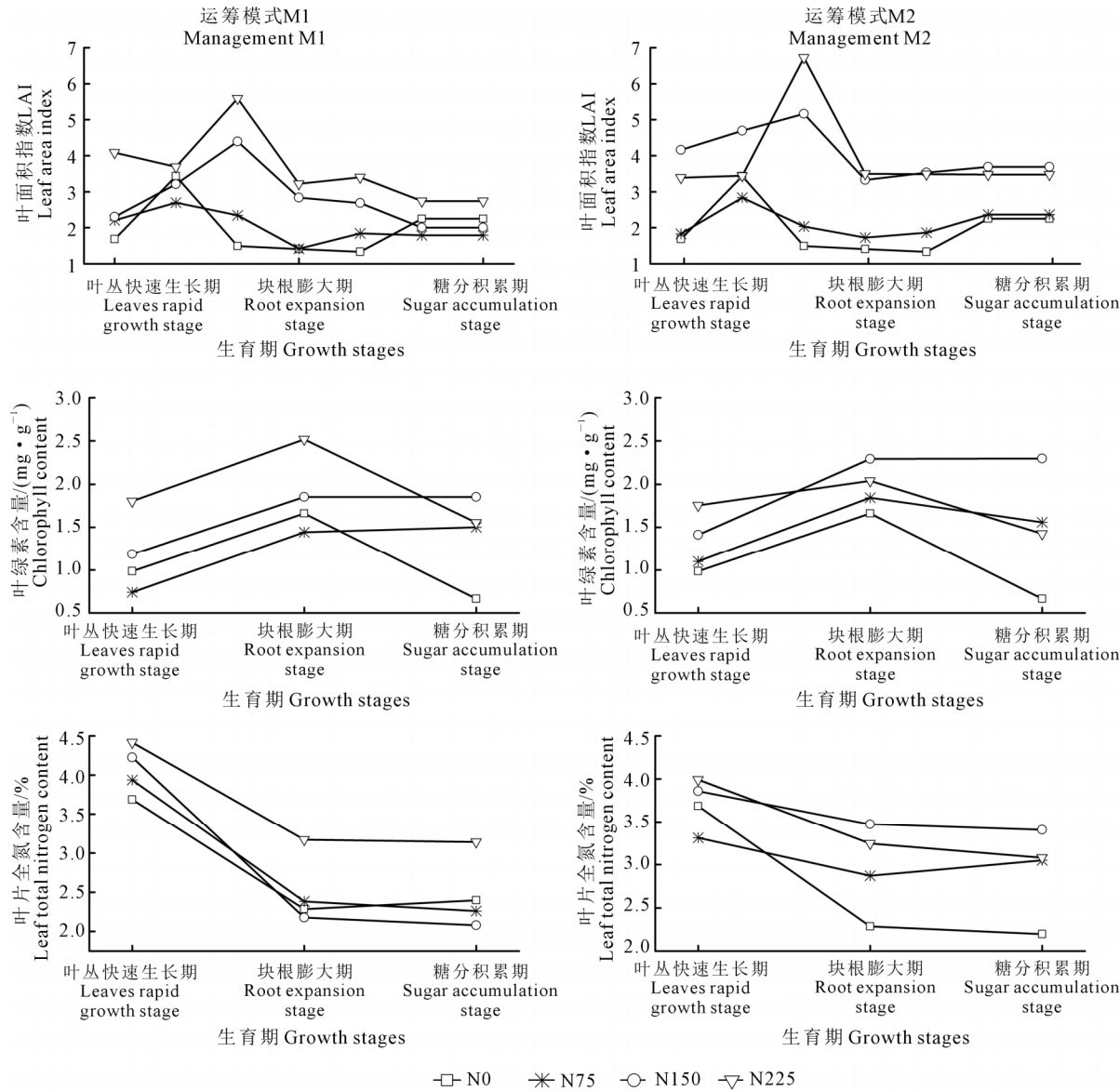


图 1 不同氮素处理甜菜 LAI、叶绿素含量与叶片全氮含量变化
Fig.1 The changes of LAI and chlorophyll content under different nitrogen management

波段 (400 ~ 700 nm) 和近红外波段 (700 ~ 1 300 nm), M2 在糖分积累期的冠层高光谱反射率均低于 M1 运筹模式。此外, 与 M1 相比, M2 氮素运筹模式下 N75、N150、N225 冠层高光谱反射率分别提高了 0.1% ~ 4%、1% ~ 14%、12% ~ 18%。M2 氮素运筹模式下甜菜冠层高光谱反射率在块根膨大期和糖分积累期之间的差异较小, 可能与 M2 氮素运筹模式下甜菜生育后期叶片衰老速度减慢有关。

2.3 不同施氮处理下甜菜红边参数

以甜菜叶丛快速生长期为例, 不同施氮处理下甜菜冠层光谱红边均具有“双峰”现象, 但处理间的红边特征各异 (图 4a, b)。随着施氮量的增加, 甜菜冠层光谱红边“双峰”现象越加明显, 且峰值相对更高。与 N0 相比, N75、N150、N225 处理在主峰 718 nm

处的峰值分别提高了 30%、39% 与 53% (图 4b), 且随着施氮量的增加, $D_{\lambda_{red}}$ 呈现上升趋势。两种氮素运筹模式的红边随着生育进程的推进“双峰”现象逐渐减弱 (图 4c, d)。

2.4 甜菜叶片农学参数与冠层光谱的相关性

从高光谱波段中选择部分波段, 进一步对其组合构成的植被指数 (R_{680}/R_{550} , R_{980}/R_{680} , R_{980}/R_{550} , R_{1090}/R_{550} , R_{1200}/R_{550} , R_{1285}/R_{550})、红边特征参数与甜菜叶片农学参数进行相关分析 (表 1), 其中全氮含量与光谱变量之间显著相关, R_{980}/R_{680} 与全氮含量之间相关性要优于其他光谱变量。LAI 和叶片叶绿素含量与红边特征参数之间均达到了极显著相关, 但与光谱变量之间的相关性较差, 其中 LAI 与 λ_{red} 之间的相关性要优于 $D_{\lambda_{red}}$ 与 S_{red} , 叶片叶绿素含量与 $D_{\lambda_{red}}$ 的相关性要优于 λ_{red} 与 S_{red} 。块根产量在叶丛快速生长期的相关性均大于其他时期, 其中与红边参数之间的相关性要优于与光谱变量之间的相关性, 但仍未达到显著水平。

3 讨 论

作物冠层光谱特征是其自身随生育时期变化生理参数与农学参数的反映, 并且从整个生育期来看, 甜菜冠层光谱特征与农学参数有密切的关系。随着施氮水平的提高, 甜菜叶面积指数 LAI 与叶绿素

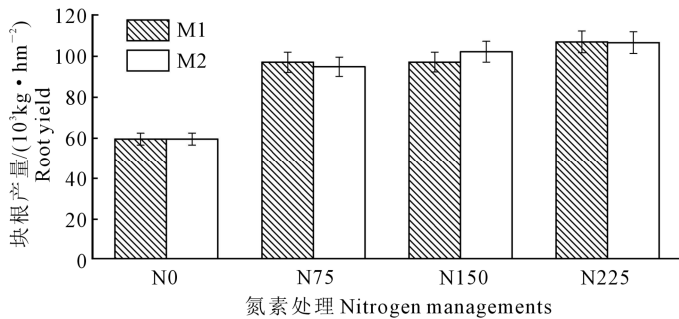


图 2 不同氮素处理甜菜块根产量变化

Fig.2 The change of root yield under different nitrogen managements

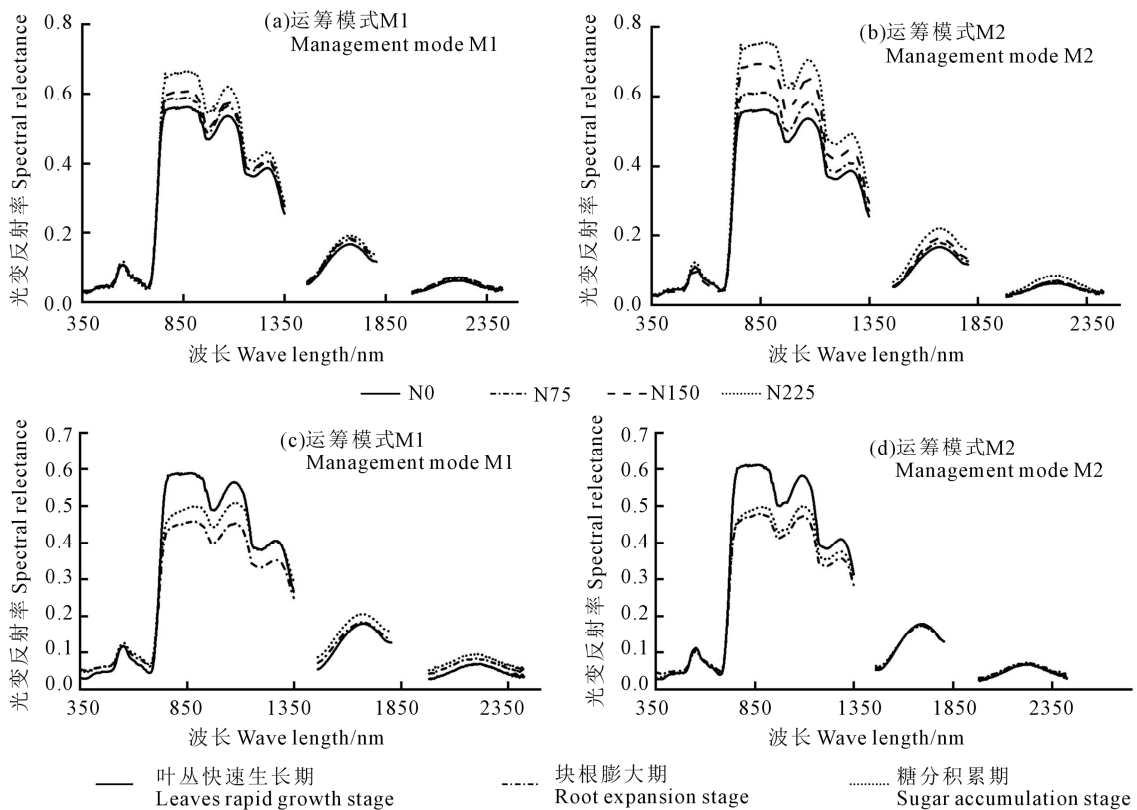


图 3 不同施氮处理甜菜冠层高光谱反射率

Fig.3 Hyperspectra reflectance of beet canopy under different nitrogen management modes

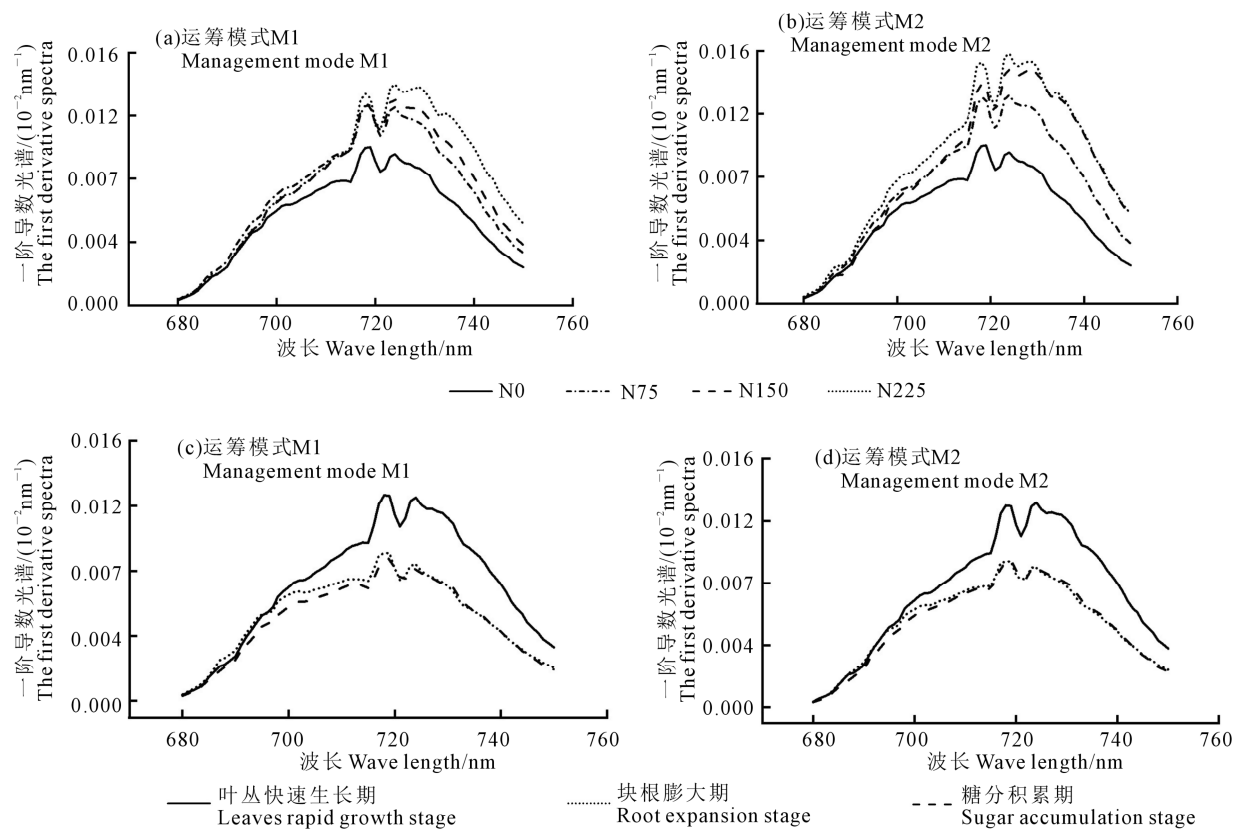


图 4 不同施氮处理下甜菜冠层光谱红边参数

Fig.4 The red edge of spectra of beet canopy under different nitrogen managements

表 1 冠层光谱与甜菜农学参数相关系数

Table 1 Correlation coefficients of beet canopy spectral and its agronomic parameters

农学参数 Agronomic parameter	红边斜率 $D_{\lambda_{red}}$	红边位置 λ_{red}	红边面积 S_{red}	R680/R550	R980/R680	R980/R550	R1090/R550	R1200/R550	R1285/R550
全氮含量 Total N/%	0.161	0.146	0.129	-0.611 **	0.676 **	0.641 **	0.623 **	0.577 *	0.574 *
叶面积指数 LAI	0.727 **	0.757 **	0.704 **	-0.177	0.121	0.163	0.172	0.143	0.157
叶绿素含量 CHL	0.690 **	0.614 **	0.653 **	-0.153	0.132	0.150	0.150	0.118	0.126
块根产量 Yield	0.553	0.589	0.681	-0.532	0.546	0.523	0.514	0.489	0.489

注: ** 极显著水平 ($P<0.01$), * 显著水平 ($P<0.05$), N%、LAI、CHL 分别表示植株叶片全氮含量、叶面积指数、植株叶绿素含量。
Note: ** indicates significant correlation at $P<0.01$; * indicates significant correlation at $P<0.05$. N%, LAI, and CHL denote the total nitrogen content, leaf area index, and chlorophyll content of plant leaves, respectively.

含量均呈现上升趋势,同时在近红外区域的冠层光谱反射率增大。不同氮素运筹模式下的甜菜冠层光谱反射率表明,在可见光波段(400~700 nm),尤其是 550 nm 波长附近存在叶绿素强反射峰区,并且在此波段内,M2 氮素运筹模式下糖分积累期的冠层高光谱反射率均低于 M1 运筹模式,可能与糖分积累期甜菜绿叶面积较大,光合能力较强,对红光和蓝光的吸收较强,其反射率逐渐降低,促使绿色波段形成的反射峰较低有关。在近红外波段(700~1 300 nm),在不同施氮处理下差异较为明显,各时期之间也形成较大差异。

甜菜冠层光谱的红边均具有“双峰”现象,随着生育时期推进,“双峰”现象逐渐减弱,可能是由于

甜菜叶丛快速生长期,叶面积指数增大,生物量增加,所受到的土壤背景影响较小,“双峰”现象也更加明显,但到块根膨大期,光合同化产物开始向块根运输,LAI 有所减少,尤其到糖分积累期之后,甜菜植株下部叶片开始变黄、脱落,土壤背景对冠层光谱影响较大。通过分析甜菜植株冠层的“红边”及其红边参数发现,两种氮素运筹模式下甜菜冠层反射光谱的红边位置均处于 712~728 nm 之间,没有出现“红移”现象,可能因为甜菜叶丛快速生长期主要以生长叶片为主,此时 LAI、叶绿素含量均已达到峰值。

甜菜叶片全氮含量与光谱变量(R680/R550、R980/R680、R980/R550、R1090/R550)之间均达到
(下转第 215 页)