

高光谱研究不同施肥条件对冬小麦冠层光谱的影响

张 玥¹, 田园盛¹, 孙文义^{1,2*}, 穆兴民^{1,2}, 高 鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}

1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100
2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100

摘 要 高光谱定量研究土壤养分含量和冬小麦冠层光谱特征之间的关系, 可为冬小麦养分丰缺监测和科学合理指导施肥方案提供理论依据和技术支持。基于 35 年长期定位试验, 研究黄土高原渭北旱塬土壤不同施肥处理对冬小麦冠层不同生育期光谱特征的影响, 结果表明: 在单一施肥条件下, 与不施肥(CK)相比, 冬小麦从拔节期到抽穗期, 单施 P 的 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值均高于 CK, 而单施 N 和 M 的光谱反射率显著低于 CK。拔节期单施 P, N 和 M 的 CR_{500} 值分别为 CK 的 1.2 倍、74.9% 和 70.5%; CR_{670} 值分别为 CK 的 1.2 倍、66.8% 和 62.6%; CR_{550} 值分别为 CK 的 1.2 倍、76.2% 和 76.9%。冬小麦抽穗期各处理反射特征峰谷比拔节期明显增强, 单施 P, N 和 M 的 CR_{500} 值分别为 CK 的 1.2 倍、81.0% 和 53.5%; CR_{670} 值分别为 CK 的 1.3 倍、76.8% 和 40.6%; CR_{550} 值分别为 CK 的 1.2 倍、78.5% 和 63.4%。冬小麦至灌浆期, 各处理反射特征峰谷均明显减弱; 至成熟期, 不同施肥处理下冬小麦光谱的“峰谷”差异不再明显。包络线去除后单一施肥条件下的红谷光谱特征表明, 除成熟期外, 单施 P 的冬小麦红谷面积(A)、红谷左面积(AL)和吸收峰对称度(S)均高于 CK, 单施 N 和 M 均低于 CK。在组合施肥条件下, 所有施氮组合 NMP, NP 和 NM 均表现出相似的规律, 在可见光波段红、蓝光吸收谷深度和绿光反射峰值以及近红外波段的光谱反射率均显著低于 CK; PM 组合光谱反射特征值略低于 CK。与 CK 相比, 冬小麦从拔节期到抽穗期, PM 组合处理光谱反射率特征值略低于 CK; NM, NPM 和 NP 处理光谱反射率特征值之间差异较小但显著低于 CK。NM, NPM 和 NP 处理的 CR_{500} 值分别为 CK 的 25.85%, 27.99% 和 26.07%; CR_{670} 值分别为 CK 的 12.56%, 13.27% 和 13.98%; CR_{550} 值分别为 CK 的 33.39%, 35.38% 和 37.04%。而 PM 处理 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 CK 的 67.52%, 55.69% 和 79.40%。冬小麦至灌浆期, 各组合处理反射特征峰谷较抽穗期均明显减弱; 冬小麦至成熟期, 不同施肥组合处理之间的光谱反射吸收特征差异不明显, 但均显著低于 CK。连续统去除后组合施肥条件下的红谷光谱特征表明, 各生长期冬小麦红谷面积(A)CK 最大, PM 处理次之, NM 处理最小。

关键词 冬小麦; 施肥处理; 长期定位试验; 高光谱

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0535-08

引 言

高光谱定量监测植被生长过程和反演生物理化参量已成为研究地表植被地学过程强有力的技术手段。由于高光谱数据具有丰富的光谱信息, 被测地物的光谱特征可以得到充分体现, 许多学者已经开展了大量应用高光谱精细光谱信息进行植被类型识别和生物物理化学特征参量的反演研究, 并且建立了不少能够反映植被生长状况的高光谱植被指数进行植

被动态监测。

冬小麦作为黄土高原的主要农作物, 对其进行长势监测, 科学施肥管理, 有助于提高小麦产量, 改善小麦品质, 以及防止过量施肥引起水土污染^[1]。利用高光谱进行冬小麦养分含量、叶面积指数、叶绿素含量等各种植被生物物理化学参数的研究已有不少报道^[2]。贺佳^[3]等对黄土高原旱地冬小麦不同生育时期进行研究, 构建了叶面积指数统一监测模型。王凡^[4]等利用冬小麦冠层高光谱和田间同步实测生物量含量, 建立了基于提取的生物量敏感波段的冬小麦监测模

收稿日期: 2019-01-02, 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金委青年科学基金项目(41501293), 国家重点研发计划项目(2016YFC0402401)资助

作者简介: 张 玥, 1995 年生, 西北农林科技大学水土保持研究所硕士研究生 e-mail: 17792126331@163.com

* 通讯联系人 e-mail: sunwy@ms.iswc.ac.cn

型。Fernandez^[5]等利用红光(670 nm)和绿光(550 nm)两波段的线性组合预估小麦的氮含量,具有显著的相关性。姚付启^[6]等通过对不同水氮胁迫下冬小麦高光谱特征差异进行研究,得出在不同水分条件下冬小麦在可见光波段反射率随氮素含量减少而升高。不少学者已经进行了对冬小麦碳、氮、磷等单一元素生物化学参量的探索,但缺乏不同元素不同组合施肥下冬小麦高光谱特征的研究。本文基于 35 年长期定位试验,研究了不同土壤施肥水平和不同施肥组合对冬小麦光谱特征的影响,探索土壤养分含量—植被生物理化参量—冬小麦冠层光谱特征之间的定量关系,为不同生育期冬小麦养分丰缺监测和科学合理指导施肥方案提供理论依据和技术支持。

1 实验部分

1.1 研究区概况

长期定位试验区位于陕西省咸阳市长武县十里铺村(34°59′09″—35°18′37″N, 107°38′49″—107°58′02″E),属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,地处黄土高原沟壑区,是典型的旱作农业区。试验地海拔 1 200 m,年均降水量 578.5 mm,年均气温 9.2 °C, >10 °C 积温 3 019 °C,无霜期 172 d,

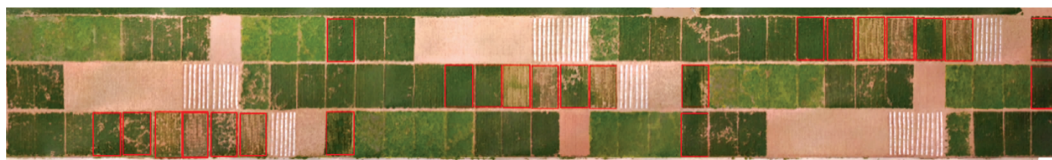


图 1 渭北旱塬农田生态系统长期定位试验

Fig. 1 Long-term fertilization experiment of farmland ecosystem in Weibei dryland

表 1 施肥方案

Table 1 Fertilization rates of the experiment plots

小区标号	施肥处理	施肥含量		
		N	P	M
12	NM	120	60	75
28	NPM	120	60	0
29	NP	0	60	0
30	P	120	0	0
31	N	0	0	75
32	M	0	0	0
33	CK	0	60	75
36	PM	120	0	75

1.2 数据与处理

1.2.1 光谱测定

利用美国 ASD 公司研发的 Field Spec4 仪器进行光谱测定,其波长范围: 350~2 500 nm; 波长重复性: 0.1 nm; 波长精度: 0.5 nm。分别在 2017 年 4 月 22 日(冬小麦拔节期)、5 月 11 日(冬小麦抽穗期)、6 月 1 日(冬小麦灌浆期)和 6 月 18 日(冬小麦成熟期)晴天中午前后 10:00—14:00 之间进行了 4 次光谱测定,风力不超过 3 级。测量时探头保持与水平面的法线夹角在 ±10°之内,避免了阴影干扰。光谱测定时选

土壤为粘化黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性良好,肥力中等。

试验于 1984 年开始,布设长期定位试验(图 1),试验开始时,施入耕层土壤(0~20 cm)的养分含量为:有机质 10.5 g·kg⁻¹,土壤速效钾 129.3 mg·kg⁻¹,土壤有效磷 3.0 mg·kg⁻¹,土壤全磷含量 0.659 g·kg⁻¹,土壤碱解氮含量 37.0 mg·kg⁻¹,土壤全氮含量为 0.57 g·kg⁻¹,pH 为 8.3。试验地土壤养分含量和地貌特征在黄土高原区域具有一定的代表性。

对长期定位试验中不同施肥处理条件下不同生育期的冬小麦连作种植系统冠层进行了光谱测定。长期定位试验按照区组设计布设,方案如表 1: NPM(氮、磷、有机肥配施)、NP(氮、磷肥配施)、NM(氮、有机肥配施)、PM(磷、有机肥配施)、P(单施磷肥)、N(单施氮肥)、M(单施有机肥)、CK(对照,不施肥)8 种施肥方式,共 3 次重复。试验单个小区的面积是 66.7 m²,小区的间距为 0.5 m,区组的间距为 1.0 m。试验时所用的氮肥是尿素 CO(NH₂)₂,磷肥是过磷酸钙 Ca(H₂PO₄)₂·H₂O,有机肥是牛粪。种植作物为冬小麦“长武 134”,在作物播种前定量将肥料一次性全部撒入小区内,翻入土中,田间管理同大田。

用标准视场角进行测定,得到纯度较高的光谱。光谱测量前,需对标准参考板进行定标校准,然后对目标地物进行测量。每隔 10 min 校准一次。同时详细记录了测点的位置、小麦长势并配以照相记录。分别对冬小麦 24 个小区(8 种施肥处理 3 个区组)不同生育期(拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期)进行了光谱测量,每个小区不同位置测定 5 次,以其平均值作为该小区小麦的光谱反射值。

1.2.2 数据处理

利用 ASD 光谱仪配套的光谱数据处理软件 ViewSpecPro 对光谱曲线进行了去噪、平滑处理。光谱分析过程中去除了 1 350~1 420, 1 790~1 930 和 2 400 nm 处大气水汽吸收形成的噪声干扰。

对反射光谱进行连续统去除运算,获取了冬小麦光谱的“峰、谷”变化特征。计算方程见式(1)

$$R_c(\lambda) = a\lambda + b \quad (1)$$

其中, R_c 为连续统线反射率; λ 为波长位置; a 为连续统线截距; b 为连续统线斜率。

连续统去除反射率 $R'(\lambda)$ 为每个波段光谱吸收处的反射率与相对应波段位置处连续统线比值

$$R'(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R_c(\lambda)} \quad (2)$$

包络线去除后可以提取波段深度(BD)、吸收峰面积(A)、吸收峰左侧面积(AL)和吸收峰对称度(S)等特征值,其计算方法如下

$$B_D = 1 - R' \quad (3)$$

$$A = \int_{\lambda_{\text{star}}}^{\lambda_{\text{end}}} CR, A_L = \int_{\lambda_{\text{start}}}^{\lambda_{BD}^{\text{max}}} CR \quad (4)$$

$$S = A_L / A \quad (5)$$

式中: R' 为光谱反射率连续统去除值; CR 为原始光谱相应波段对应的连续统去除值; A_L 是红谷左半端的面积, A 为红谷面积是宽度和深度的综合参数^[7]。

2 结果与讨论

2.1 单一施肥条件下不同施肥处理对冬小麦冠层光谱特征的影响

不同生育期冬小麦冠层光谱特征的变化因施肥处理的不同表现出明显差异(图 2)。

冬小麦拔节期,在可见光波段(380~760 nm)形成以 500 nm 为中心的蓝光吸收谷和以 670 nm 为中心的红光吸收谷,以及以 550 nm 为中心的绿光反射峰,但不同施肥处理其吸收反射特征差异显著。单施 P 的光谱反射率高于 CK,单施 N 和 M 的光谱反射率低于 CK。CK 的去包络值 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 0.467, 0.422 和 0.601; 单施 P, N 和 M 的 CR_{500} 值分别为 CK 的 1.2 倍、74.9% 和 70.5%; CR_{670} 值分别为 CK 的 1.2 倍、66.8% 和 62.6%; CR_{550} 值分别为 CK 的 1.2 倍、76.2% 和 76.9%。在近红外波段(760~1 300 nm)形成了一个高反射峰,其中单施 P 光谱反射率略低于 CK,但单施 N 和 M 的光谱反射率显著高于 CK。在短波红外波段(1 300~2 500 nm), 1 450 及 1 940 nm 附近受到水分的强吸收作用形成两个吸收谷,不同施肥处理的反射特征规律与可见光区相似。

冬小麦抽穗期,可见光区不同施肥处理条件下形成蓝光(500 nm)和红光(670 nm)的吸收谷以及绿光(550 nm)的反射峰特征差异比拔节期明显增强。单施 P, N 和 M 的 CR_{500} 值分别为 CK(0.572)的 1.2 倍、81.0% 和 53.5%; CR_{670} 值分别为 CK(0.534)的 1.3 倍、76.8% 和 40.6%; CR_{550} 值分别为 CK(0.734)的 1.2 倍、78.5% 和 63.4%。近红外区,冬小麦冠层光谱在 980 和 1 200 nm 处的吸收特征增强,形成了两个水分吸收谷。单施 M 的光谱反射率显著高于 CK,单施 P 的反射光谱略高于 CK,单施 N 与 CK 处理冠层光谱反射率差异不大。在短波红外区,单施 P 显著高于 CK,单施 N 与 CK 相似,单施 M 处理显著低于 CK。

冬小麦灌浆期,在可见光波段不同施肥处理条件下蓝光和红光的吸收以及绿光的反射特征规律与拔节期相似,但反射吸收特征明显减弱。单施 M 光谱反射率显著低于 CK,单施 N 与 CK 相似,单施 P 的反射光谱略高于 CK。CK 的 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 0.290, 0.269 和 0.346,单施 P, N 和 M 的 CR_{500} 值分别为 CK 的 66.6%, 82.4% 和 57.9%; CR_{670} 值分别为 CK 的 59.1%, 77.7% 和 46.1%; CR_{550} 值分别为 CK 的 62.1%, 78.3% 和 76.9%。在近红外

波段,单施 P 的光谱反射率与 CK 相似,单施 N 光谱反射率略高于 CK,单施 M 显著高于 CK。短波红外波段不同施肥处理的反射特征规律与可见光区相似。

随着冬小麦成熟变黄,不同施肥处理条件下冬小麦光谱的“峰谷”变化特征差异不再明显。在可见光范围内红光的吸收特征和近红外高反射特征显著减弱。总体上单施 P 反射光谱特征和 CK 相似且差异不大,单施 N 和 M 的光谱反射率在各个波段均低于 CK。

利用连续统去除法提取红谷特征参数值(表 2)表明,单施 M 的红谷深度(BD)在各生长期均最大,变化范围在 0.736~0.876; 其次为单施 N 处理; 单施 P 处理的 BD 均最小; CK 红谷吸收深度小于单施 M 和 N,但大于 P 处理。冬小麦拔节期、抽穗期和成熟期的红谷面积(A)、红谷左面积(AL)和吸收峰对称度(S)均为单施 P 高于 CK,单施 N 和 M 低于 CK; 冬小麦灌浆期红谷面积和左面积表现为 CK 最高,单施 N、M 次之,单施 P 最小。

表 2 连续统去除后红谷光谱特征参数
Table 2 Red band absorption valley characteristic parameters of continuum removal

		P	N	M	CK
拔节期	BD	0.504	0.718	0.736	0.578
	λ_{BD}	680	680	680	680
	A	133.301	87.484	85.941	115.046
	AL	79.392	47.111	45.656	66.792
抽穗期	S	0.596	0.539	0.531	0.581
	BD	0.292	0.592	0.780	0.466
	λ_{BD}	681	681	679	681
	A	168.904	109.855	81.195	137.909
灌浆期	AL	107.304	64.221	41.971	84.102
	S	0.635	0.585	0.517	0.611
	BD	0.841	0.792	0.876	0.732
	λ_{BD}	680	680	679	680
成熟期	A	38.181	50.295	43.774	64.109
	AL	24.909	31.369	24.523	40.917
	S	0.652	0.624	0.560	0.638
	BD	0.791	0.843	0.837	0.815
成 熟 期	λ_{BD}	681	679	679	681
	A	45.755	34.615	34.558	39.729
	AL	30.432	22.142	22.044	26.438
	S	0.665	0.640	0.638	0.665

2.2 组合施肥条件下不同施肥处理对冬小麦冠层光谱特征的影响

不同生育期冬小麦冠层光谱特征因 N, P 和 M 组合处理的不同表现出明显的差异(图 3)。

冬小麦拔节期,在可见光波段 CK 的蓝光吸收谷(500 nm)和红光吸收谷(670 nm)以及绿光反射峰(550 nm)特征值最大; PM 组合处理光谱反射率特征值略低于 CK; NM, NPM 和 NP 处理光谱反射特征值之间差异较小但显著低于 CK。CK 处理的 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 0.468, 0.422

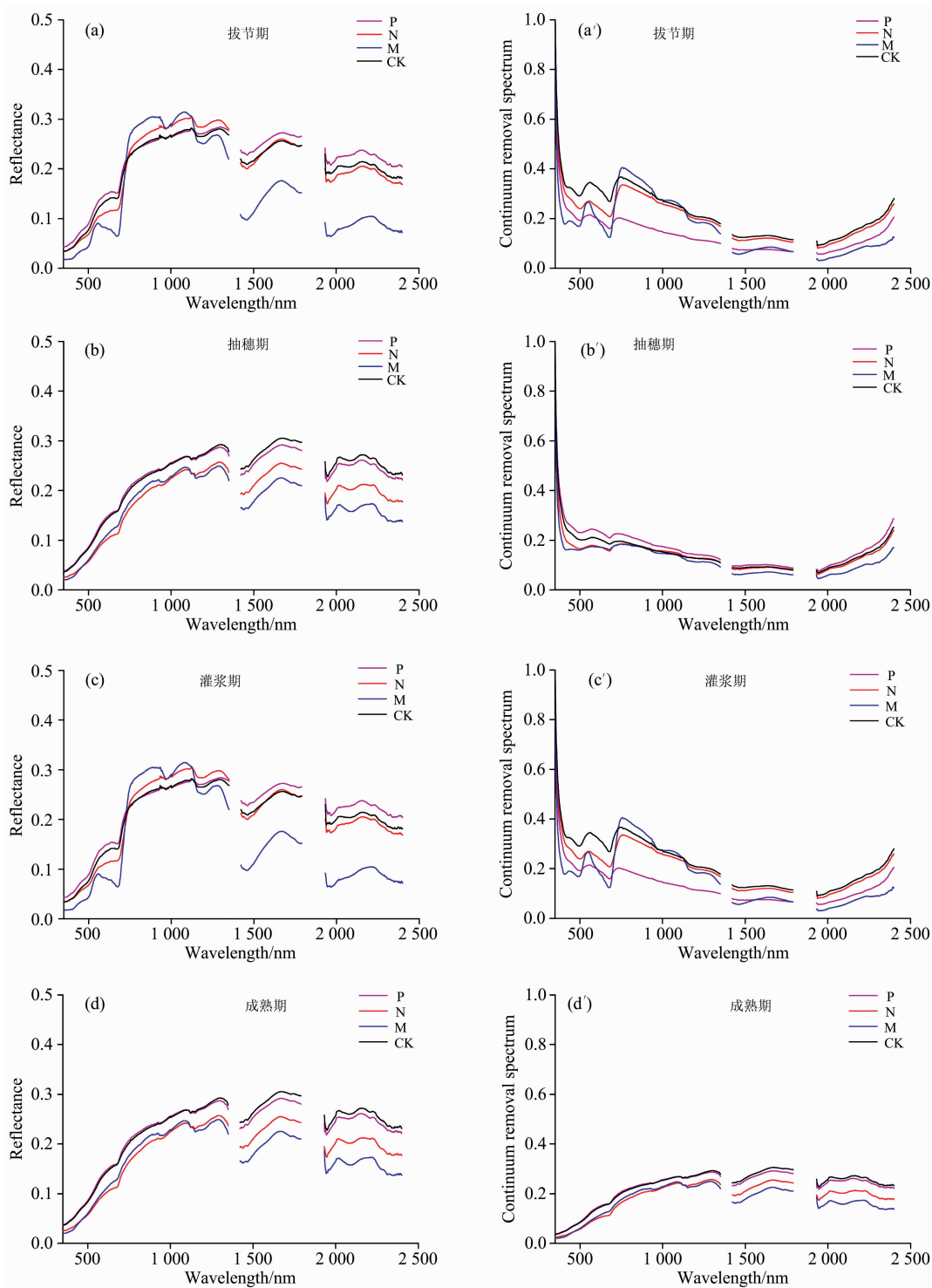


图 2 单一施肥处理的冬小麦冠层高光谱特征

Fig. 2 Hyperspectral characteristics of winter wheat canopy treated by single fertilization

和 0.602, NM, NPM 和 NP 处理的 CR_{500} 值分别为 CK 的 25.85%, 27.99% 和 26.07%; CR_{670} 值分别为 CK 的 12.56%, 13.27% 和 13.98%; CR_{550} 值分别为 CK 的 33.39%, 35.38% 和 37.04%。而 PM 处理 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 CK 的 67.52%, 55.69% 和 79.40%。在近红

外波段, CK 光谱反射率最低, PM 处理的光谱反射率略高于 CK, 但 NPM, NM 和 NP 显著高于 CK, 其中 NPM 最高。在短波红外波段, 不同施肥处理的反射特征规律与可见光区相似。

冬小麦抽穗期, 在可见光波段不同施肥处理条件下形成

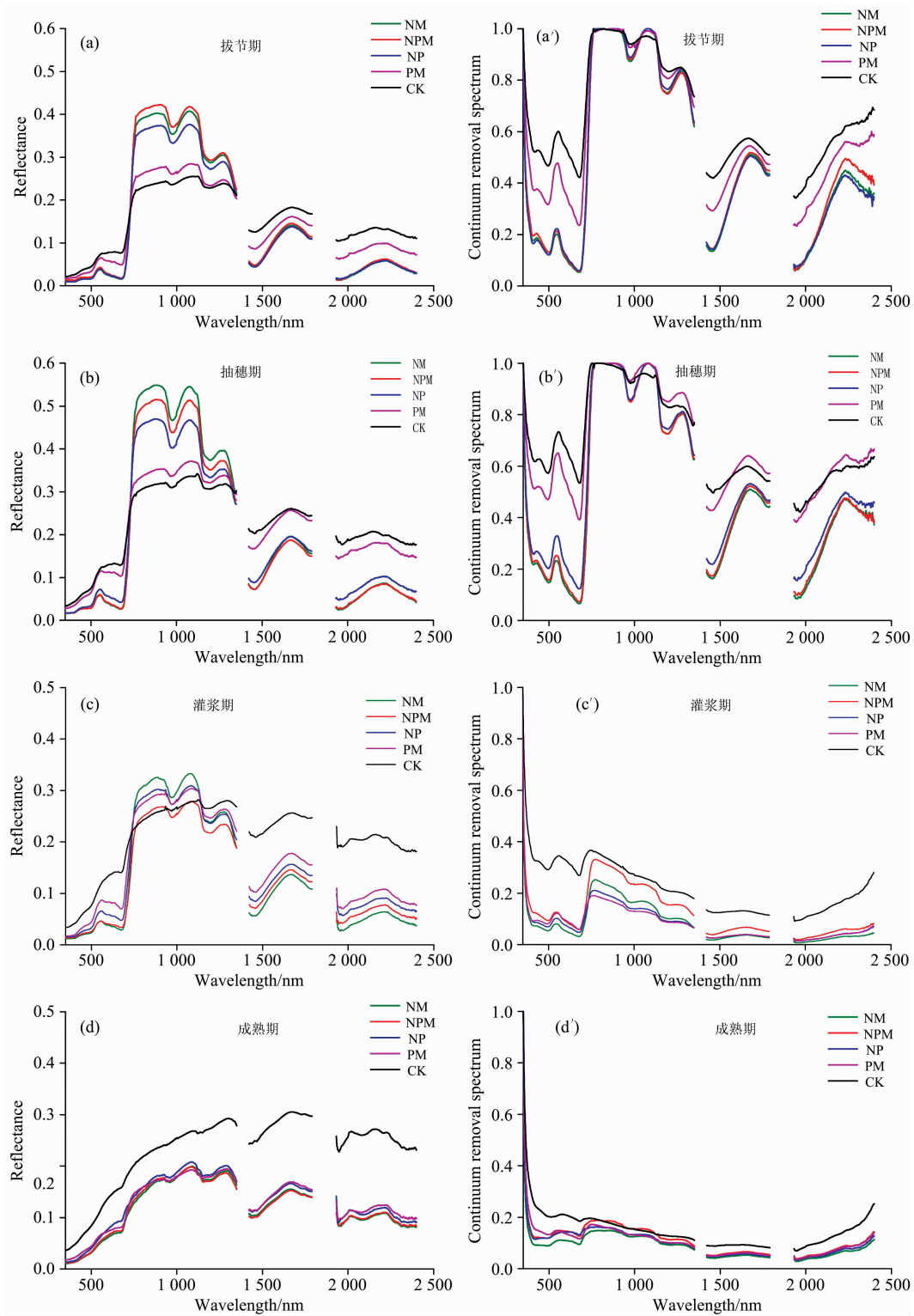


图 3 组合施肥处理的冬小麦冠层高光谱特征

Fig. 3 Hyperspectral characteristics of winter wheat canopy treated by combined fertilization

蓝光(500 nm)和红光(670 nm)的吸收谷,以及绿光(550 nm)的反射峰与拔节期相似,但特征值差异比拔节期更大。CK的光谱反射和吸收特征值最大,CR₅₀₀, CR₆₇₀和 CR₅₅₀值分别为 0.573, 0.534 和 0.734。NM, NPM 和 NP 处理的 CR₅₀₀ 值

分别为 CK 的 25.65%, 27.40% 和 35.25%; CR₆₇₀ 值分别为 CK 的 12.36%, 13.67% 和 22.85%; CR₅₅₀ 值分别为 CK 的 31.47%, 34.33% 和 31.61%。PM 处理 CR₅₀₀, CR₆₇₀ 和 CR₅₅₀ 值分别为 CK 的 81.85%, 73.41% 和 88.69%。在近红

外波段, PM 处理光谱反射率略高于 CK, NPM, NM 和 NP 的光谱反射率显著高于 CK, 其中 NM 最高。短波红外波段 PM 光谱反射率略低于 CK, 但 NM, NPM 和 NP 处理光谱反射率显著低于 CK。

冬小麦灌浆期光谱反射有较大变化, 不同施肥处理条件下蓝光和红光的吸收以及绿光的反射特征较抽穗期明显减弱。在可见光波段 CK 的 CR_{500} 值、 CR_{670} 值和 CR_{550} 值分别为 0.291, 0.268 和 0.346; NPM, NP 和 NM 的 CR_{500} 值分别为 CK 的 32.30%, 23.37% 和 18.56%; CR_{670} 值分别为 CK 的 16.76%, 13.58% 和 9.25%; CR_{550} 值分别为 CK 的 47.01%, 38.01% 和 29.85%。PM 处理 CR_{500} , CR_{670} 和 CR_{550} 值分别为 CK 处理的 27.49%, 17.34% 和 45.15%。在可见光波段和近红外波段, CK 的光谱反射率显著高于 NM, NPM, NP, 其次为 PM 处理, NPM 和 NM 处理光谱反射率特征值最低且差异较小, NP 略高于 NPM 和 NM 处理。短波红外区, 各施肥处理反射吸收特征开始减弱, 反射峰较抽穗期较低, 其中 NM 光谱反射率低于 NPM, NP 和 PM 处理。

冬小麦成熟期, 不同施肥组合处理之间的光谱反射吸收特征差异不明显, 但均显著低于 CK。

表 3 连续统去除后红谷光谱特征参数

Table 3 Red band absorption valley characteristic parameters of continuum removal

		NM	NPM	NP	PM	CK
拔节期	BD	0.947	0.944	0.941	0.765	0.578
	λ_{BD}	677	677	675	679	680
	A	38.334	39.321	42.090	85.311	115.046
	AL	13.248	14.060	14.768	43.915	66.792
	S	0.346	0.358	0.351	0.515	0.581
抽穗期	BD	0.934	0.927	0.877	0.608	0.466
	λ_{BD}	677	678	679	680	681
	A	42.022	44.263	57.578	116.898	137.909
	AL	15.815	17.722	26.141	67.087	84.102
	S	0.376	0.401	0.454	0.574	0.611
灌浆期	BD	0.969	0.941	0.953	0.941	0.732
	λ_{BD}	678	679	679	679	680
	A	14.244	22.286	17.494	20.541	64.109
	AL	6.505	11.153	9.151	11.500	40.917
	S	0.457	0.501	0.523	0.560	0.638
成熟期	BD	0.906	0.874	0.869	0.884	0.815
	λ_{BD}	677	677	677	680	681
	A	22.692	29.932	28.814	27.525	39.729
	AL	13.480	17.997	16.777	17.172	26.438
	S	0.594	0.601	0.582	0.62	0.665

利用连续统去除方法提取红谷特征参数值(表 3)表明, 各生育期各施肥处理的红谷位置比较稳定。各生育期 CK 的红谷吸收深度值 BD 均最小, 分别为 0.578, 0.466, 0.732 和 0.815; NM 处理的红谷吸收深度最大, 分别为 0.947, 0.934, 0.969, 0.906; 其次为 NPM; PM 处理的红谷吸收深度均小于 NM, NPM 和 NP, 但大于 CK。冬小麦红谷面积

(A)、红谷左面积(AL)和对称度(S)均表现为 CK 最大, PM 处理次之, NM 处理最小。

3 讨论

关于开展土壤养分含量—植被生物理化参量—冬小麦冠层光谱特征之间的定量关系已有不少报道。赵君伟等^[8]对冬小麦不同生育期耕层土壤养分及其冠层反射光谱进行测定, 结果表明在拔节期、灌浆期和成熟期, 水浇地土壤耕层硝态氮和速效磷含量与植被指数的相关模拟效果达到显著水平。高林^[9]等通过不同植被指数探究不同土壤类型对冬小麦叶面积指数的影响, 通过回归模型分析了各土壤类型下各项植被指数与叶面积指数的相关性。受土壤背景条件的干扰, 不同学者研究往往存在较大差异。长期定位试验可以消除环境背景条件的干扰, 能够真实地反映特定气候条件下施肥处理对冬小麦特征光谱的影响。长期定位试验在监测土壤肥力变化, 评价施肥效应, 长期评估增产效应, 探究生态环境质量演变规律等方面具有重要意义。

基于高光谱技术能快速无损地监测作物生长状况以及获取养分丰缺信息。王慧芳等利用冠层光谱反射率对冬小麦冻害胁迫进行反演, 建立了基于冠层尺度上的冬小麦冻害严重度反演估测模型。王乐辉等^[10]对叶片含磷量与光谱反射率做相关分析, 得出抽穗期是小麦营养光谱诊断的最佳时期。崔贝等^[11]对比了施肥前后冬小麦冠层光谱变化量以及归一化植被指数的差异, 发现不同施肥处理之间冬小麦长势和光谱特征存在差异。单一施肥条件下小麦光谱特征的研究较多, 缺乏两种及以上组合施肥条件下小麦光谱特征的深入研究。本研究发现, 所有施氮组合 NMP, NP 和 NM 均表现出相似的规律, 可见光波段的红、蓝光吸收谷吸收深度 BD 值以及近红外波段的光谱反射率均显著高于 CK, 而 PM 组合光谱反射特征值略低于 CK。赵刚峰^[12]研究认为, 氮在植物生长发育过程中是植物细胞原生质、蛋白质、叶绿素的重要组成部分, 叶片光合作用随施氮量增加而加强, 对可见光吸收强, 是造成可见光波段施氮组合光谱反射率低于 CK 的主要原因。其次, 组合施肥处理的光谱反射率在可见光波段均低于单一施肥和 CK, 近红外波段的光谱反射率都较单一施肥高。表明组合施肥产生协同效应, 具有明显的耦合效应, 能提高小麦的光能和养分利用率。

4 结论

基于长期定位试验, 研究了黄土高原渭北旱原不同施肥处理对冬小麦冠层光谱特征的影响, 取得以下成果。

(1)冬小麦从拔节期到抽穗期, 不同施肥处理下蓝红光吸收谷和绿光反射峰特征差异比拔节期明显增强; 至灌浆期, 反射特征峰谷明显减弱; 至成熟期, 不同施肥处理条件下冬小麦光谱的“峰谷”变化特征差异不再明显。

(2)单一施肥条件下, 可见光区单施 P 的蓝、红光吸收谷(CR_{500} , CR_{670})和绿光反射峰(CR_{550})均高于 CK, 单施 N 和 M 的光谱反射率显著低于 CK。近红外区, 单施 P 光谱反

射率略低于 CK, 但单施 N 和 M 显著高于 CK。短波红外区不同施肥处理的反射特征规律与可见光相似。

表现出相似的规律, 在可见光波段红、蓝光吸收谷吸收深度和绿光反射峰的反射率峰值以及近红外波段的光谱反射率均显著低于 CK; PM 组合光谱反射特征值略低于 CK。

(3) 组合施肥条件下所有施氮组合 NMP, NP 和 NM 均

References

- [1] ZHAO Jia-jia, FENG Mei-chen, YANG Wu-de, et al(赵佳佳, 冯美臣, 杨武德, 等). Journal of Shanxi Agricultural Sciences(山西农业科学), 2015, 43(6): 673.
- [2] ZHANG Ying-shi(赵英时). Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application(遥感应用分析原理与方法). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2013. 36.
- [3] HE Jia, LIU Bing-feng, LI Jun(贺佳, 刘冰峰, 李军). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 24(30): 141.
- [4] WANG Fan, LI Min-yang(王凡, 李敏阳). Journal of Shanxi Agricultural Sciences(山西农业科学), 2018, 46(5): 718.
- [5] Fernandez S, Vidal D, Simon E, et al. International Journal of Remote Sensing, 2012, 15: 1867.
- [6] YAO Fu-qi, CAI Huan-jie, SUN Jin-wei, et al(姚付启, 蔡焕杰, 孙金伟, 等). Journal of Yangtze River Scientific Research Institute(长江科学院院报), 2015, 32(3): 95.
- [7] LI Zhen-zhen, ZHENG Xiang, NIU De-kui, et al(李真真, 郑翔, 牛德奎, 等). Pratacultural Science(草业科学), 2016, 33(8): 1492.
- [8] ZHAO Jun-wei, FENG Mei-chen, YANG WU-de(赵君伟, 冯美臣, 杨武德). Journal of Shanxi Agricultural Sciences(山西农业科学), 2015, 43(1): 35.
- [9] GAO Lin, WANG Xiao-fei, GU Xing-fa, et al(高林, 王晓菲, 顾行发). Chinese Journal of Plant Ecology(植物生态学报), 2017, 41(12): 1273.
- [10] WANG Le-hui, JI Yu, SHU Fang, et al(王乐辉, 吉宇, 舒芳, 等). Guangdong Meteorology(广东气象), 2016, 38(1): 61.
- [11] CUI Bei, HUANG Wen-jiang, YANG Wu-de, et al(崔贝, 黄文江, 杨武德, 等). Plant Nutrition and Fertilizer Science(植物营养与肥料学报), 2013, 19(1): 11.
- [12] ZHAO Gang-feng, LI Jun, LIU Bing-feng(赵刚峰, 李军, 刘冰峰). Journal of Triticeae Crops(麦类作物学报), 2012, 32(3): 530.

Effects of Different Fertilization Conditions on Canopy Spectral Characteristics of Winter Wheat Based on Hyperspectral Technique

ZHANG Yue¹, TIAN Yuan-sheng¹, SUN Wen-yi^{1, 2*}, MU Xing-min^{1, 2}, GAO Peng^{1, 2}, ZHAO Guang-ju^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract Quantitative study of the relationship between soil nutrient content and canopy spectral characteristics of winter wheat based on hyperspectral techniques can provide theoretical basis and technical support for winter wheat nutrient abundance monitoring and scientific and rational guidance of fertilization programs. In a 35-year long-term positioning experiment, the effects of different fertilization treatments on the spectral characteristics of winter wheat canopy in different growth stages of Loess Plateau were studied. The results showed that under single fertilization conditions, compared with no fertilization (CK), from the jointing stage to the heading stage of the winter wheat, the CR₅₀₀, CR₆₇₀ and CR₅₅₀ values of single P application were higher, while the spectral reflectance of single N and M application was significantly lower. The CR₅₀₀ values of single P, N and M application in jointing stage were 1.2 times, 74.9% and 70.5% of CK; CR₆₇₀ values were 1.2 times, 66.8% and 62.6% of CK; CR₅₅₀ values were 1.2 times, 76.2% and 76.9% of CK, respectively. The peaks and valleys of the reflex characteristics of winter wheat were significantly enhanced at heading stage than those at jointing stage, at heading stage, the CR₅₀₀ values of P, N and M application were 1.2 times, 81.0% and 53.5% of CK; the CR₆₇₀ values were 1.3 times, 76.8% and 40.6% of CK; CR₅₅₀ values were 1.2 times, 78.5% and 63.4% of CK, respectively. At the filling stage, the peaks and valleys of the reflex characteristics of each treatment were obviously weakened; to the maturity stage, the difference between the peaks and valleys of the winter

wheat spectrum under different fertilization treatments was no longer obvious. The spectral characteristics of the red band position absorption valley under single fertilization conditions after enveloping line removal showed that, except for the maturity period, the red band absorption valley area (A), the red band absorption valley left area (AL) and the absorption peak symmetry (S) of winter wheat with single P application were higher than CK, both with N and M application were lower than CK. Under the combined fertilization conditions, the NMP, NP and NM of all nitrogen application combinations showed similar patterns, and the red, blue absorption depth and green reflection peak and the near-infrared spectral reflectance in the visible light range were significantly lower than CK; the spectral reflectance eigenvalue of the PM combined treatment was slightly lower than CK. Compared with CK, the characteristic value of spectral reflectance of PM combined treatment was slightly lower from the jointing stage to the heading stage; the difference between the spectral reflectance values of NM, NPM and NP treatment was small but significantly lower than CK. The CR_{500} values of NM, NPM and NP treatment were 25.85%, 27.99% and 26.07% of CK; CR_{670} values were 12.56%, 13.27% and 13.98% of CK; CR_{550} values were 33.39%, 35.38% and 37.04% of CK, respectively. The CR_{500} , CR_{670} and CR_{550} values of PM treatment were 67.52%, 55.69% and 79.40% of CK, respectively. At grain filling stage, the peaks and valleys of each treatment were significantly weaker than those at heading stage. At maturity stage, the spectral reflectance absorption characteristics of different fertilization treatments were not significantly different, but they were significantly lower than CK. The spectral characteristics of red band absorption valley under combined fertilization conditions after enveloping line removal showed that the area of red band absorption valley (A) of the winter wheat was the largest in CK, followed by PM treatment and NM treatment.

Keywords Winter wheat; Fertilization conditions; Long-term positioning experiment; Hyperspectral

(Received Jan. 2, 2019; accepted May 10, 2019)

* Corresponding author