植物营养与肥料学报 2021, 27(7): 1198–1212
Journal of Plant Nutrition and Fertilizers
doi: 10.11674/zwyf.20617
http://www.plantnutrifert.org

应用多酚–叶绿素仪监测棉花氮素营养状况研究

殷 星，侯振安，冶 军*，闵 伟，刘 凯，王方斌，廖 欢，甘浩天，刘少华，孙嘉璘
（石河子大学农学院农业资源与环境系，新疆石河子 832003）

摘要:【**目的**】通过田间试验，研究使用多酚–叶绿素仪对棉花进行快速无损氮素营养诊断适宜的指标。【**方法**】田间试验在新疆石河子市进行，设 3 个施氮处理，分别为施纯 N 0、180 和 240 kg/hm^2，分别用 N0、N180 和 N240 表示。所有氮肥分 5 次随滴灌施入，每次施肥后 3 天，利用多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 和 SPAD 叶绿素仪分别测定 20 株棉花叶片的氮平衡指数 (NBI)、Chl 值和 SPAD 值，同步采样测定棉花叶片全氮含量，及 0—20 cm、0—40 cm 和 0—60 cm 土层硝态氮含量。【**结果**】随着施氮量的增加棉花叶片全氮含量和土壤硝态氮含量均显著增加。其中，0—40 cm 土层硝态氮含量与棉花叶片全氮含量关系最密切。增加氮肥施用量，棉花叶片氮素营养诊断指标 NBI、Chl 值和 SPAD 值均显著增加。棉花叶片 NBI、Chl 和 SPAD 与叶片全氮含量均呈极显著正相关关系，且相关系数 (r) 均达到 0.8 以上。相关性模型校验结果表明，棉花叶片全氮含量实测值与预测值的平均相对误差 (RE) 分别为–4.0% (NBI)、–3.1% (Chl) 和–5.7% (SAPD)。其中，氮平衡指数 (NBI) 模型对棉花叶片全氮含量的预测精度最高，与实测值的相关系数达到了 0.9143，平均绝对百分比误差 (MAPE) 为 6.91%；标准均方根误差 (nRMSE) 为 8.21%。棉花叶片 NBI、Chl 和 SPAD 与土壤硝态氮的模型决定系数表现为 NBI > Chl > SPAD。模型校验分析表明，NBI 模型与 0—40 cm 土层硝态氮实测含量的相关性最高，相关系数为 0.9116，预测值与实测值的 MAPE 和 nRMSE 分别为 14.11% 和 17.88%。【**结论**】应用多酚–叶绿素仪监测棉花氮素营养，氮平衡指数 (NBI) 与棉花叶片氮含量和 0—40 cm 土层硝态氮含量的相关性最高，预测值与实测值的误差仅为 6.91% 和 14.11%，可以满足膜下滴灌条件下棉花氮素营养的快速诊断需求。

关键词: 多酚–叶绿素仪；氮素平衡指数；叶绿素；SPAD；土壤硝态氮含量；棉花叶片全氮含量；模型预测精度

Application of polyphenol-chlorophyll meter to monitor cotton N nutrition status

YIN Xing, HOU Zhen-an, YE Jun*, MIN Wei, LIU Kai, WANG Fang-bin, LIAO Huan, GAN Hao-tian, LIU Shao-hua, SUN Jia-lin
(*Department of Resources and Environmental Science, Colloge of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China*)

Abstract:【**Objectives**】We studied the suitable parameter in diagnosing cotton N nutrition using the polyphenol-chlorophyll meter in the field.【**Methods**】A field experiment was set up in Shihezi, Xinjiang, with three N application rates: N 0, 180, and 240 kg/hm^2, expressed as N0, N180 and N240. The N fertilizer treatments were topdressed 5 times with drip irrigation. Nitrogen balance index (NBI), Chl, and SPAD values of 20 cotton plants leaves were measured on the third day after topdressing, using both Polyphenol-chlorophyll meter (Dualex-4) and SPAD chlorophyll meter. The total N content of cotton leaves and the nitrate-nitrogen content in 0–20 cm, 0–40 cm and 0–60 cm soil layers were determined simultaneously.【**Results**】With increasing N applicationrate, the total N content of cotton leaves and soil nitrate-nitrogen content increased significantly. The soil NO_3^--N content in the 0–40 cm soil layer had the closest relationship with the total N content of cotton leaves. The NBI, Chl, and SPAD values of cotton leaves significantly increased with

收稿日期：2020–12–23　　**接受日期：**2021–05–12
基金项目：国家重点研发计划（2017YFD0200100，2018YFD0800800）；兵团中青年科技创新领军人才计划（2016BC001）。
联系方式：殷星 E-mail：18290777404@163.com；* 通信作者 冶军 E-mail：yejun.shz@163.com

increasing N application rate, and were positively correlated with the total N content of cotton leaves. The correlation coefficients were all above 0.8. The average relative error (RE) of the measured and predicted values of leaf total N content was –4.0% (NBI), –3.1% (Chl), and –5.7% (SAPD), respectively. The NBI exhibited the highest prediction accuracy for leaf N content, with an *r*-value of 0.9143, average absolute percentage error (MAPE) of 6.91%, and the standard root mean square error (nRMSE) was 8.21%. The model determination coefficient (R^2) of the diagnostic index with soil NO_3^--N content was in the descending order NBI > Chl > SPAD. The NBI was the most sensitive to NO_3^--N content in 0–40 cm soil layer, with *r*-value of 0.9116, MAPE of 14.11%, and nRMSE of 17.88%.【**Conclusions**】When using the polyphenol-chlorophyll meter to diagnose N nutrition, we find that the N balance index (NBI) is sensitive and accurate in reflecting cotton leaf N content and the NO_3^--N content in 0–40 cm soil layer. The average absolute percentage error (MAPE) between the predicted and measured values is as low as 6.91% and 14.11%, respectively, which could meet the requirement for rapid diagnosis of cotton N nutrition.

Key words: polyphenol-chlorophyll meter; nitrogen balance index; chlorophyll; SPAD; soil nitrate content; leaf total N content; prediction accuracy

土壤 NO_3^--N 是作物氮素的主要来源，作物吸收的氮素约 50% 来自于土壤，有些则高达 70% 以上[1]。土壤中的氮素常常不能满足作物生长需求，需要通过施肥来补充[2]。但过量施肥会导致氮肥利用率降低，土壤温室气体排放加剧，及地表水、地下水污染等一系列环境问题[3]。因此，适时合理的施肥至关重要。由于作物当季吸收利用的氮素养分来自于土壤硝态氮和铵态氮，二者均属无机氮[4]。侯秀玲等[5]研究表明，通过测定一定土壤剖面中的无机氮含量来确定作物的氮肥用量，即土壤无机氮法 (Nmin)，可以减少氮肥损失、提高氮肥利用率。还有研究认为，在旱地土壤中只需通过测定土壤硝态氮含量进行施肥研究也是行之有效的方法[6]。然而，土壤 Nmin 法有一定的专业性要求，测试周期相对较长，且费时费力，很难满足棉花膜下滴灌技术对养分状况的实时需要[7]。

作物氮素养分与土壤无机氮密切相关[8]，测定作物氮素含量可以反映土壤的供氮能力以及施肥效应。叶片是植物光合作用合成有机物的主要器官，在可见光波段内植株叶片对光的反射率和吸收率受叶绿素的影响最大[9]。叶片中的全氮有 50%～70% 用于叶绿体的形成[10]，叶绿素含量随着施氮量的增加而增加[11]，这一发现为采用叶绿素仪进行作物氮素营养诊断提供了理论基础，并且已经在棉花[12]、小麦[13]和玉米[14]等作物上开展了大量研究。王亚飞[15]研究表明小麦叶片叶绿素相对含量 (SPAD 值)，在一定施氮量范围内随施氮量的增加而增加；过量施氮，SPAD 值甚至出现下降趋势。Richardson 等[16]研究发现，随着叶绿素含量的增加，通过 SPAD 值估算叶片叶绿素含量的准确性较差。此外，也有研究应用多酚仪 (Dualex-3) 测定小麦和玉米叶片中多酚 (Phen) 含量来诊断氮素营养状态[17-19]。Cartelat 等[17]提出联合使用 SPAD 仪和多酚仪 (Dualex-3)，采用叶绿素与多酚含量的比值 (Chl/Phen 比值) 能更好地表征小麦氮素状况。Tremblay 等[18]证实玉米叶片的 Chl/Phen 比值与施氮量密切相关，且较其他诊断指标更为敏感和稳定。目前，多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 可直接测定 Chl/Phen 比值，并称为氮平衡指数 (NBI)[11]。但是应用多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 在滴灌棉花氮素营养诊断方面的研究还鲜有报道。

新疆是我国最大的优质棉花生产基地[20]，据 2019 年国家统计局资料显示，棉花种植面积占全国棉花面积的 76%、总产占全国 84.9%，连续 25 年位居全国第一。本研究通过田间试验，应用多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 和 SPAD 叶绿素仪进行棉花氮素营养诊断，探讨多酚-叶绿素仪 (Dualex-4) 用于棉花氮素营养诊断的可行性，为新疆棉花氮肥合理施用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

1.1.1 氮肥用量试验　　氮肥用量试验于 2019 年在新疆石河子市天业生态园进行。土壤类型为灌耕灰漠土，质地为壤土。耕层 (0—20 cm) 土壤容重 1.32 g/cm^3、有机质 18.9 g/kg、全氮 1.13 g/kg、有效磷 28.74 mg/kg、速效钾 421 mg/kg、硝态氮含量 7.97

mg/kg。供试棉花品种‘新陆早45号’。

试验设置3个施氮水平，分别为施纯氮0、180和240 kg/hm²，用N0、N180和N240表示。每个处理重复3次，共9个试验小区，小区面积为45.6 m²。

棉花采用膜下滴灌，1膜3管6行，行距配置为(66+10) cm，株距10 cm，毛管间距为76 cm。棉花于2019年4月20日播种，采用“干播湿出”方式，即播种后滴出苗水40 mm。棉花于5月5日出苗，生长期间共灌水9次，灌溉定额450 mm，灌水从6月中旬开始，8月下旬结束，灌水周期7～12天。试验中各处理氮肥在棉花生长期内分5次随水滴施，施用时间及比例分别为：2019年6月24日(9%)、7月6日(13%)、7月10日(23%)、7月20日(25%)、7月30日(30%)。各处理磷钾肥施用量保持一致，P_2O_5 105 kg/hm²、K_2O 75 kg/hm² 全部追施。其它栽培管理措施与当地大田生产一致。

各试验小区随机选取3个采样点，于每次施肥后第3天，即分别于出苗后54、66、70、80、90天，每个样点选择长势均匀一致的棉花20株，于上午9:00—12:00，使用多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 和SPAD叶绿素仪分别测定倒四叶叶片上部[10, 21-22]，并记录测定的氮平衡指数 (NBI)、Chl值和SPAD值。同时，采集测试植株叶片样品，于105℃杀青30 min后，在75℃下烘干至恒重。样品被粉碎后过1 mm筛，用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮后，凯氏定氮法测定叶片的全氮含量[23]。

每个试验小区在用叶绿素仪监测后，随机选取3个采样点，每个样点选择棉花长势均匀的位置，在两株棉花间滴灌带出水口的下方，用土钻采取0—20 cm、20—40 cm和40—60 cm土样，装入自封袋，当天带回实验室称取鲜土样5 g，加入2 mol/L KCl 50 mL浸提，振荡1 h后过滤，采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量[24]。并同步取部分鲜样放入干燥的铝盒中，用烘干法测定土壤含水率。0—40 cm和0—60 cm土层硝态氮含量，通过不同土层硝态氮含量进行加权平均计算得出。

1.1.2 大田验证试验　试验于2020年在石河子大学教学实验场进行，根据调查，选取氮肥施用量存在一定差异的棉田30块，施氮量在250～330 kg/hm²，其耕层 (0—20 cm) 土壤肥力见表1。在棉花开花期取样，植株和土壤采集及测试方法同1.1.1。

1.2 模型的建立与验证

1.2.1 模型的建立　采用2019年氮肥用量试验获取的数据，分别进行土壤硝态氮与棉花叶片全氮含量相关性，氮素营养诊断指标 (NBI、Chl和SPAD) 与棉花叶片全氮和土壤硝态氮含量相关性分析。根据相关系数判断两个变量之间的相关程度，对达到显著水平的变量之间进行回归分析。根据分析的结果建立以下模型：1) 棉花叶片全氮含量的预测模型；2) 土壤硝态氮的预测模型。

1.2.2 模型的验证　采用2020年大田调查试验获得的氮素营养诊断指标 (NBI、Chl和SPAD) 预测棉花叶片全氮和土壤硝态氮含量。采用相关系数、均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和相对误差 (RE) 作为模型预测精度的评价指标。一般而言，相关系数相对较高或者MSE、RMSE、MAE相对较低，说明模型的预测精度较高；反之，模型预测精度较低。其中，相关系数 $|r| \geqslant 0.8$ 时为高度相关；$0.5 \leqslant |r| < 0.8$ 时为中度相关；$0.3 \leqslant |r| < 0.5$ 时为低度相关[25]。RE (%) 的评价范围为：$-5 \leqslant RE \leqslant 5$ (优)；$-10 \leqslant RE < -5$ 或 $5 < RE \leqslant 10$ (良)；$-20 \leqslant RE < -10$ 或 $10 < RE \leqslant 20$ (中)；> 20 或 < -20 (差)[26]。

比较各诊断指标对棉花氮素营养状况预测时，采用平均绝对百分比误差 (MAPE) 和标准均方根误差 (nRMSE) 进行表征，因为MAPE、nRMSE属于无量纲统计量。因此，可以在不同变量间进行比较，其值越小则表明模型模拟精确度越高。

表1 供试棉田0—20 cm土层土壤肥力指标

Table 1 Soil fertility index in 0–20 cm layer of the cotton fields

指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	标准差 SD
全氮 Total N (g/kg)	0.60	1.30	0.94	0.19
有机质 Organic matter (g/kg)	10.17	20.59	14.82	3.26
有效磷 Available P (mg/kg)	5.97	27.56	15.82	6.58
速效钾 Available K (mg/kg)	258.73	444.40	331.38	62.04
硝态氮 Nitrate N (mg/kg)	6.85	30.16	14.92	6.75

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F_i - A_i)^2 \tag{1}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F_i - A_i)^2} \tag{2}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|F_i - A_i| \tag{3}$$

$$\mathrm{RE} = \frac{(A_i - F_i)}{A_i}\times 100\% \tag{4}$$

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{F_i - A_i}{A_i}\right| \tag{5}$$

$$\mathrm{nRMSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\bar{A}_i}\times 100\% \tag{6}$$

式中：F_i—为第 i 个预测值；A_i—为第 i 个实测值；$\bar{A}_i$—实测值平均。

1.3　数据处理与分析

数据方差分析用 SPSS 11.5 进行，处理间多重比较采用 Duncan 法 ($P < 0.05$ 为差异显著)，试验数据相关和回归分析采用 Excel 2013 制作图表。

2　结果与分析

2.1　不同施氮水平下土壤硝态氮含量的变化

随着施氮量的增加，0—20 cm 和 20—40 cm 土层硝态氮含量均显著增加，且在棉花出苗后 54～70 天急剧增加，80～90 天缓慢增加，然而在 40—60 cm 土层，出苗后 54 天 N180 和 N240 处理土壤硝态氮含量差异不显著，可能是因为前期氮肥投入比例较小，向下层的迁移能力较弱 (图 1)。

图 1 显示，施氮肥显著影响土壤中的硝态氮含量，每次施肥后 3 个施肥处理之间的硝态氮含量差异显著，此外，随着施氮量的增加，0—20 cm 土层硝态氮含量与 20—40 cm 和 40—60 cm 土层的差异加大，显示出表层硝态氮的积累。

2.2　不同施氮水平下棉花叶片全氮含量的变化

增施氮肥可提高棉花叶片全氮含量 (图 2)。其中，在出苗后 54～70 天 (前 3 次施肥)，棉花由营养生长向生殖生长过度，养分也由营养器官向生殖器官转移，导致 N180 和 N240 处理叶片中的氮含量呈先升后降变化趋势。在 70～90天 (第 4 次、第 5 次施肥)，棉花主要以生殖生长为主，此时期土壤硝态氮含量持续稳定地增加，为棉花的生长提供了充足的养分，棉花叶片全氮含量的变化减小，且趋于稳定。不施肥对照的棉花叶片氮含量则持续下降。

2.3　土壤硝态氮与棉花叶片全氮含量的相关性分析

将不同土层深度土壤的硝态氮含量与棉花叶片全氮含量用一元线性方程进行拟合，均存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$，图 3)。棉花叶片氮含量与 0—40 cm 土壤硝态氮含量模型的决定系数 (R^2) 达到了 0.8317，且高于 0—20 cm 和 0—60 cm 土层相关性模型的决定系数。因此，0—40 cm 土层硝态氮含量与棉花叶片全氮含量关系最为密切。

2.4　不同施氮处理棉花叶片 NBI、Chl 值和 SPAD 值的变化

棉花叶片氮平衡指数 (NBI)、Chl 值和 SPAD 值对不同施肥处理的响应存在一定差异 (图 4)。3 个诊断指标在出苗后 54～66 天对施肥量的变化不是很敏

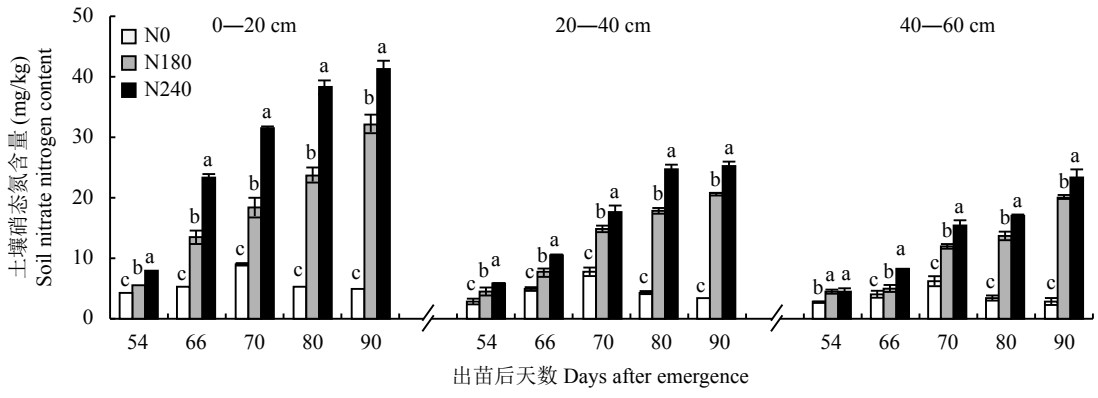

图 1　不同施氮水平下各土层硝态氮含量的变化

Fig. 1　Changes in nitrate-nitrogen content in different soil layers under different nitrogen application levels

[注（Note）：柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

感，而在出苗后 70～90 天，随施氮总量的增加，NBI 与 Chl 值变化显著，SPAD 值虽然也有变化，但变化幅度小于 NBI 和 Chl 值。

2.5 棉花氮素营养状况预测模型的建立

2.5.1 棉花叶片全氮含量预测模型　棉花氮素营养诊断指标 (NBI、Chl 值 和 SPAD 值) 与棉花叶片全氮含量均呈极显著的线性正相关关系 ($P < 0.01$，图 5)，相关系数分别为 0.8984、0.8615 和 0.8325。进一步以氮素营养诊断指标为自变量，棉花叶片全氮含量为因变量，建立棉花叶片全氮含量预测模型。其中，模型的决定系数分别为 0.8072 (NBI)、0.7421 (Chl) 和 0.6931 (SPAD)。依据决定系数，氮平衡指数对棉花叶片氮含量的预测最准确 (表 2)。

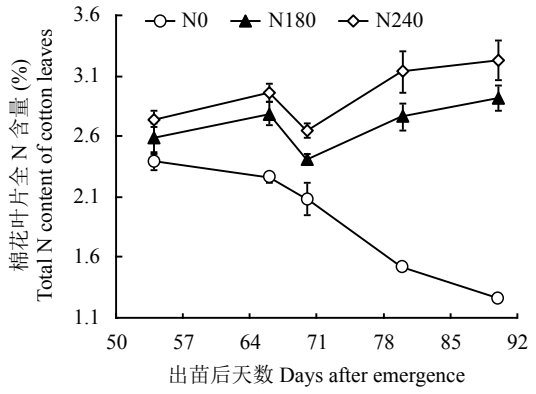

图 2 不同施氮水平条件下棉花叶片全氮含量的变化

Fig. 2 Changes in total N content in cotton leaves under different N application levels

2.5.2 土壤硝态氮含量预测模型　由图 6 可知，氮平衡指数 (NBI) 和 Chl 值与不同土层硝态氮含量之间均呈现极显著的线性正相关关系 ($P < 0.01$)，相关系数分别为 0.8883～0.9113 和 0.8392～0.8759。进一步以 NBI、Chl 值为自变量，用不同土层的土壤硝态氮含量为因变量建立回归模型，其中决定系数分别为 0.7890～0.8304 (NBI)、0.7042～0.7672 (Chl)。然而对 SPAD 而言，当 SPAD 值 < 57 时，随 SPAD 值的增加土壤硝态氮含量没有显著增加；SPAD ≥ 57 后土壤硝态氮含量随 SPAD 值的增加迅速升高，在 0—20 cm 和 0—40 cm 土层的相关系数分别为 0.6406 和 0.5721 ($P < 0.01$)，而在 0—60 cm 土层的相关系数为 0.5381 ($P < 0.05$)。总体来看，NBI 与土壤硝态氮含量线性模型的决定系数高于 Chl 和 SPAD 模型 (表 3)。

此外，NBI 与 0—40 cm 土壤硝态氮模型的决定系数为 0.8304，高于 0—20 cm 和 0—60 cm 土层硝态氮预测模型的决定系数。说明氮平衡指数 (NBI) 能够较好地反映土壤中硝态氮含量状况，特别在棉

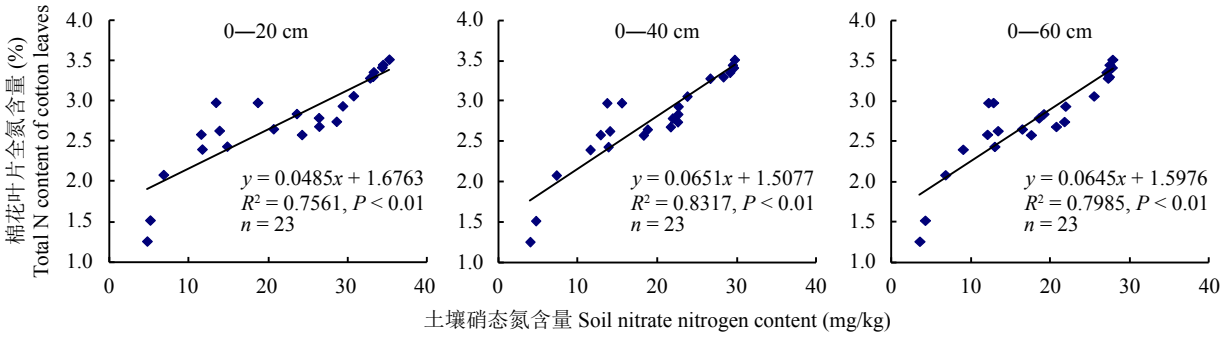

图 3 土壤硝态氮与棉花叶片全氮含量的相关性分析

Fig. 3 Correlation of soil nitrate-nitrogen and total N content of cotton leaves

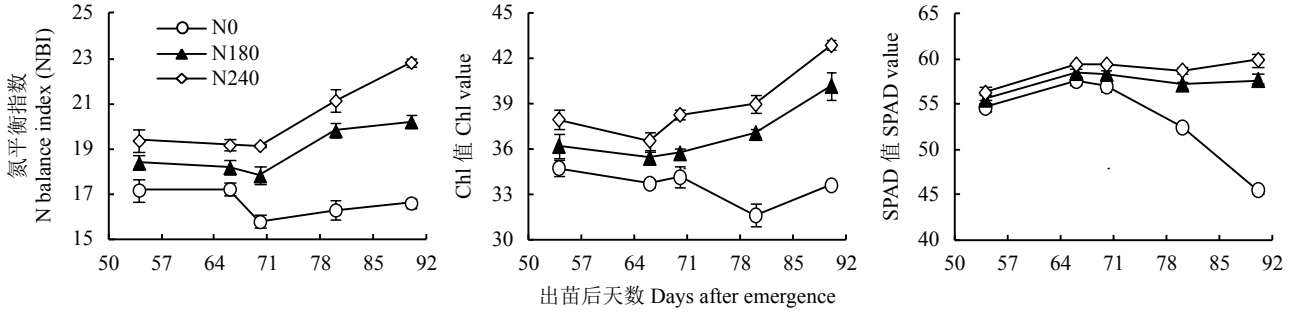

图 4 不同施氮水平下棉花叶片 NBI、Chl 值和 SPAD 值的变化

Fig. 4 Changes in NBI, Chl value and SPAD value of cotton leaves under different N application levels

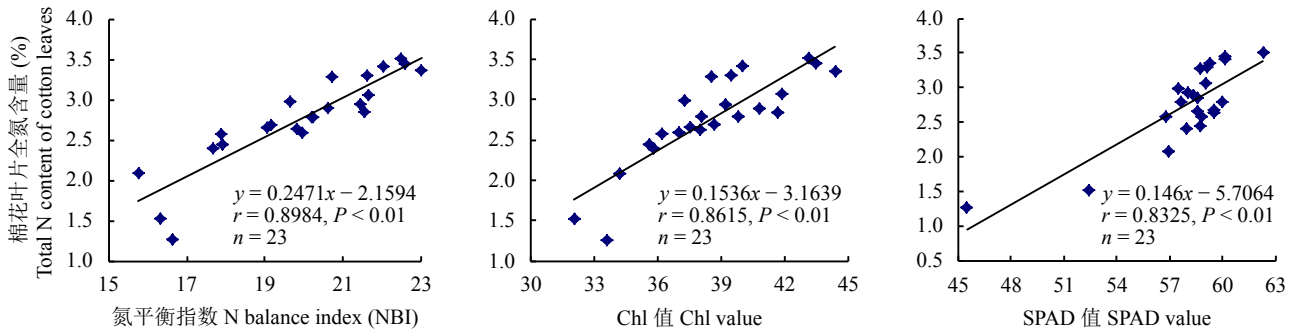

图 5　棉花叶片全氮含量 (*y*) 与氮素营养诊断指标 (*x*) 的相关性分析 (*n* = 23)

Fig. 5　Correlation analysis of cotton leaf total N content (*y*) and N nutrition diagnostic index (*x*)

表 2　棉花叶片全氮含量的预测模型

Table 2　Prediction model of total N content in cotton leaves

诊断指标 Diagnostic index	样本量 Sample number	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2
氮平衡指数 N balance index (NBI)	23	$y = 0.2471x - 2.1594$	0.8072
Chl 值 Chl value	23	$y = 0.1536x - 3.1639$	0.7421
SPAD 值 SPAD value	23	$y = 0.146x - 5.7064$	0.6931

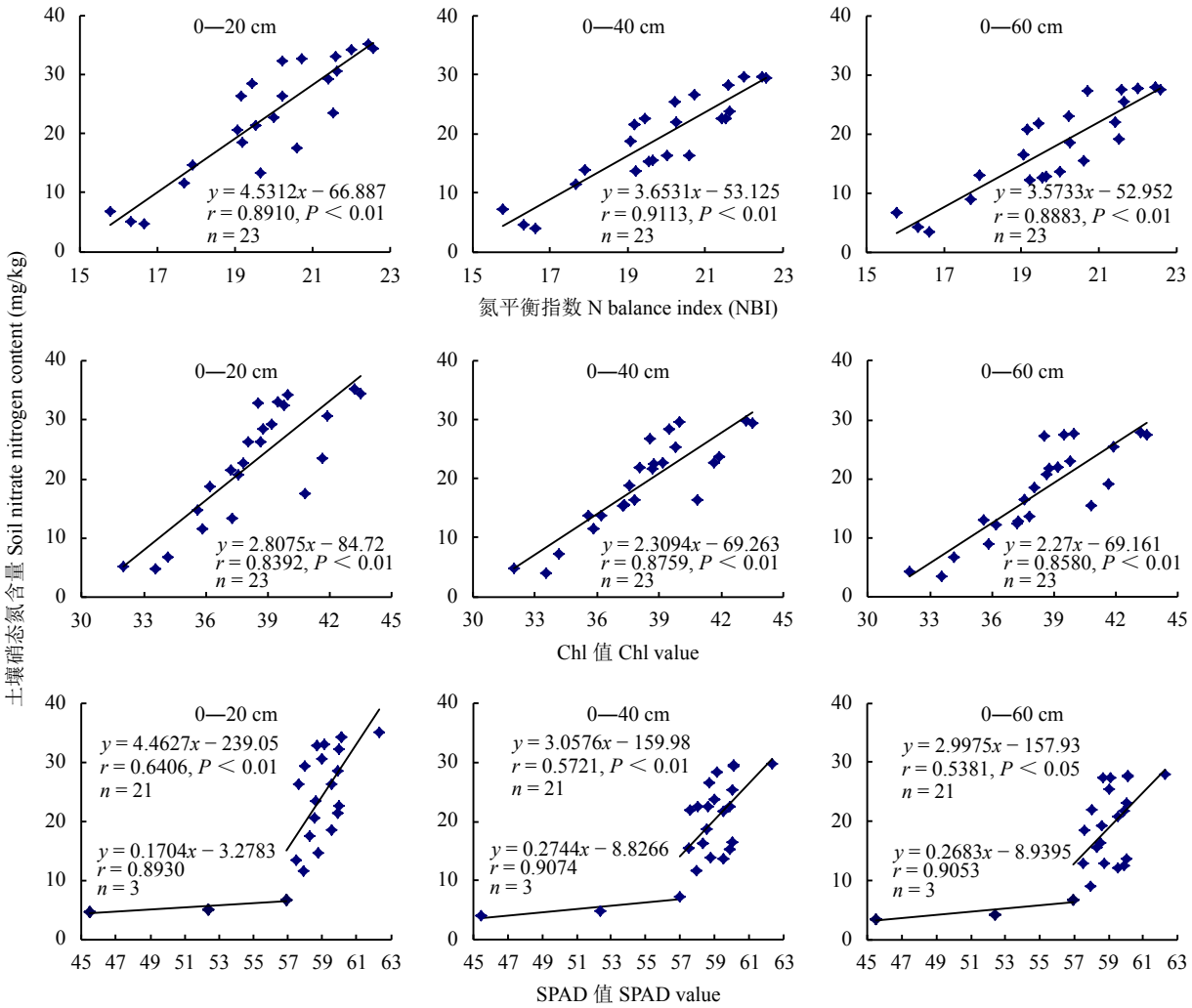

图 6　土壤硝态氮含量 (*y*) 与氮素营养诊断指标 (*x*) 的相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis of soil nitrate-nitrogen content (*y*) and N nutrition diagnostic index (*x*)

表 3 土壤硝态氮的预测模型

Table 3 Prediction model of soil nitrate-nitrogen

诊断指标 Diagnostic index	土层深度 Soil depth (cm)	样本量 Sample number	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2
氮平衡指数 N balance index (NBI)	0—20	23	$y = 4.5312x - 66.887$	0.7938
	0—40	23	$y = 3.6531x - 53.125$	0.8304
	0—60	23	$y = 3.5733x - 52.952$	0.7890
Chl 值 Chl value	0—20	23	$y = 2.8075x - 84.720$	0.7042
	0—40	23	$y = 2.3094x - 69.263$	0.7672
	0—60	23	$y = 2.2700x - 69.161$	0.7362
SPAD 值 SPAD value	0—20	21	$y = 4.4627x - 239.05$	0.4104
	0—40	21	$y = 3.0576x - 159.98$	0.3273
	0—60	21	$y = 2.9975x - 157.93$	0.2895

花根系聚集的 0—40 cm 土层，关系更为密切。

2.6 棉花氮素营养状况预测模型的验证

2.6.1 棉花叶片全氮含量预测的可靠性验证 由表 4 可知，在 30 个样点土壤硝态氮含量差异较大的地块，棉花叶片全氮含量的 NBI、Chl 和 SPAD 模型预测值与实测值之间平均相对误差 (RE) 分别为 –4.0%、–3.1% 和–5.7%。具体到每块田地，NBI 模型预测值准确性“差”的只有 1 个样点，而 Chl 和 SPAD 模型预测值准确性“差”的样点数分别为 4、9。棉花叶片全氮含量预测值与实测值之间均存在极显著的相关关系 ($P < 0.01$，表 5)。其中，相关系数分别为 0.9143 (NBI)、0.8639 (Chl)、0.6526 (SPAD)，并且 NBI 和 Chl 模型预测结果达到高度相关；而 SPAD 模型的预测结果为中度相关。NBI 模型的均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 均优于 Chl 和 SPAD 模型。且平均绝对百分比误差 (MAPE) 表现为：6.91%(NBI) < 9.37%(Chl) < 14.07%(SPAD)；nRMSE 与 MAPE 表现规律一致。说明利用氮平衡指数 (NBI) 能够较敏感地反映棉花叶片全氮含量。

2.6.2 土壤硝态氮含量预测的可靠性验证 由表 6 可知，0—20 cm 土层硝态氮实测值与预测值之间平均相对误差 (RE) 分别为：–22.59% (NBI)、–17.77% (Chl) 和–9.62% (SPAD)。然而 0—40 cm 和 0—60 cm 土层硝态氮实测值与 NBI、Chl、SPAD 模型预测值之间平均相对误差分别为：–11.65%、–7.84%、–5.34% (表 7) 和–18.18%、–14.42%、–12.31% (表 8)。由于各诊断指标是间接对土壤硝态氮含量进行预测，导致土壤硝态氮预测模型的相对误差变化范围相对较大。其中，NBI 模型的预测精度低于 Chl 和 SPAD 模型，主要是因为 Chl 和 SPAD 模型相对误差 (RE) 较大的值均多于 NBI 模型，且在计算过程中相互抵消，会影响预测精度的准确性。因此，进一步验证分析发现，NBI 模型的 MSE、RMSE、MAE 值均低于 Chl 和 SPAD 模型 (表 9)。

此外，0—20 cm、0—40 cm 和 0—60 cm 土层硝态氮实测值与 NBI 模型预测值的相关系数分别为 0.8934、0.9116 和 0.8786，且模型预测评价指标均表现为 0—40 cm 土层硝态氮含量较低。其中，0—40 cm 土层硝态氮 MAPE 和 nRMSE 分别为 14.11% 和 17.88%。说明氮平衡指数与 0—40 cm 土层硝态氮含量关系较为密切。

3 讨论

3.1 不同深度土壤硝态氮与棉花叶片全氮含量的关系

在干旱与半干旱区，土壤硝态氮对作物营养的供应起到关键的作用[27]。由于植株体内的氮素丰缺状况是土壤氮素供应能力、植物氮素需求和吸收能力的综合反映。因此，叶片氮含量可以作为一种衡量氮素营养水平高低的指标[28]。本研究表明，在棉花各生育期 0—20 cm、0—40 cm 和 0—60 cm 土层硝态氮含量与棉花叶片氮含量之间均存在极显著的线性关系。说明叶片中的氮含量可以用来反映土壤中硝态氮的丰缺程度。胡明芳等[29]研究表明，滴灌条件下硝态氮峰值出现在土壤 40 cm 深处，并且滴灌条件下棉花根系集中分布在 0—40 cm 土层，占到总根量的 85% 以上[30]，根系是作物对养分吸收的主要器官[31]，

表 4　不同诊断指标预测的棉花叶片全氮含量的相对误差

Table 4　Relative error (RE) of the predicted total N contents in cotton leaves by three diagnostic indexes

样点 Field	实测值 Measured value	氮平衡指数 N balance index (NBI)			Chl 值 Chl value			SPAD 值 SPAD value		
		测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)
1	1.962	16.6	1.947	0.75	32.2	1.78	9.06	51.6	1.827	6.88
2	2.470	19.5	2.655	−7.48	36.3	2.42	2.13	59.4	2.966	−20.07
3	2.945	20.2	2.839	3.62	37.3	2.56	13.14	53.9	2.162	26.58
4	3.131	20.6	2.935	6.26	38.1	2.68	14.30	56.9	2.600	16.95
5	2.687	20.1	2.817	−4.83	37.4	2.58	4.09	55.8	2.434	9.41
6	3.390	22.1	3.313	2.25	40.8	3.11	8.37	60.5	3.126	7.77
7	3.654	23.7	3.695	−1.13	43.6	3.53	3.43	61.2	3.233	11.51
8	3.489	23.9	3.752	−7.56	43.6	3.53	−1.29	63.3	3.531	−1.21
9	2.141	15.9	1.778	16.94	31.0	1.60	25.15	52.9	2.014	5.93
10	2.775	20.4	2.877	−3.66	38.9	2.82	−1.49	60.2	3.084	−11.13
11	2.750	20.8	2.974	−8.14	39.9	2.97	−7.86	60.3	3.097	−12.63
12	2.932	21.3	3.100	−5.73	41.8	3.25	−10.86	62.0	3.342	−13.99
13	2.673	20.8	2.987	−11.72	40.5	3.06	−14.51	61.5	3.276	−22.56
14	3.177	21.8	3.225	−1.51	42.3	3.33	−4.90	61.8	3.313	−4.31
15	3.744	23.0	3.521	5.95	44.5	3.68	1.77	64.7	3.745	−0.04
16	3.377	23.4	3.615	−7.05	45.8	3.87	−14.63	64.4	3.702	−9.61
17	3.507	22.7	3.453	1.53	42.6	3.38	3.76	59.2	2.937	16.26
18	3.584	23.5	3.653	−1.94	44.4	3.66	−2.20	63.6	3.572	0.32
19	3.757	23.2	3.573	4.89	44.4	3.66	2.65	64.6	3.725	0.84
20	3.332	23.1	3.549	−6.51	44.2	3.63	−8.79	64.8	3.754	−12.67
21	2.953	23.3	3.589	−21.57	44.0	3.60	−21.89	66.2	3.959	−34.08
22	3.409	23.2	3.577	−4.93	44.5	3.68	−7.86	66.7	4.032	−18.28
23	1.675	15.7	1.727	−3.08	31.2	1.63	2.90	51.6	1.830	−9.25
24	3.162	23.2	3.572	−12.98	45.5	3.82	−20.83	66.2	3.961	−25.29
25	3.158	22.5	3.409	−7.95	43.5	3.51	−11.26	63.9	3.616	−14.51
26	3.079	22.8	3.479	−13.01	44.3	3.64	−18.14	65.0	3.785	−22.95
27	3.469	23.3	3.605	−3.92	45.0	3.74	−7.90	62.5	3.421	1.40
28	3.559	23.0	3.520	1.11	43.2	3.46	2.66	58.3	2.805	21.18
29	2.938	22.1	3.309	−12.61	43.9	3.58	−21.81	65.0	3.784	−28.77
30	2.753	21.7	3.210	−16.61	40.6	3.07	−11.39	64.7	3.740	−35.85

注（Note）：相对误差 (RE%) 的评价范围为: −5 ≤ RE ≤ 5 (优); −10 ≤ RE < −5 或5 < RE ≤ 10 (良); −20 ≤ RE < −10或 10 < RE ≤ 20 (中); > 20或 < −20 (差). The evaluation range of the relative error RE (%) is：−5 ≤ RE ≤ 5 (Excellent); −10 ≤ RE < −5 or 5 < RE ≤ 10 (Good); −20 ≤ RE < −10 or 10 < RE ≤ 20 (Medium); > 20 or < −20 (Bad).

促进了对 0—40 cm 土层硝态氮的吸收，因此，表现为棉花叶片氮含量与 0—40 cm 土层硝态氮含量相关性较好。

3.2　氮素营养诊断指标与棉花叶片全氮含量的关系

本研究分析发现，各诊断指标与棉花叶片全氮

表 5 不同诊断指标预测的棉花叶片全氮含量的准确性 (*df* = 30)

Table 5 Prediction accuracy of total N content in cotton leaves by three diagnostic indexes

诊断指标 Diagnostic index	均方误差 MSE	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE	平均绝对误差 (%) MAPE	标准均方根误差 (%) nRMSE	相关系数 *r*
氮平衡指数 N balance index (NBI)	0.06	0.25	0.20	6.91	8.21	0.9143**
Chl值 Chl value	0.11	0.34	0.28	9.37	11.08	0.8639**
SPAD 值 SPAD value	0.26	0.51	0.42	14.07	16.80	0.6526**

注（Note）：**—$P < 0.01$.

表 6 0—20 cm 土层硝态氮预测模型相对误差的分析

Table 6 Analysis of prediction accuracy of nitrate-nitrogen in 0–20 cm soil layer

样点 Field	实测值 Measured value	氮平衡指数 N balance index (NBI)			Chl值 Chl value			SPAD值 SPAD value		
		测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)
1	6.386	16.6	8.422	−31.87	32.2	5.724	10.38	51.6	−8.775	237.40
2	17.040	19.5	21.395	−25.56	36.3	17.297	−1.51	59.4	26.034	−52.78
3	20.165	20.2	24.763	−22.80	37.3	19.866	1.49	53.9	1.465	92.74
4	27.356	20.6	26.525	3.04	38.1	22.147	19.04	56.9	14.848	45.72
5	20.339	20.1	24.359	−19.77	37.4	20.208	0.64	55.8	9.770	51.96
6	30.991	22.1	33.470	−8.00	40.8	29.878	3.59	60.5	30.928	0.20
7	34.261	23.7	40.471	−18.13	43.6	37.601	−9.75	61.2	34.201	0.17
8	34.217	23.9	41.520	−21.34	43.6	37.700	−10.18	63.3	43.305	−26.56
9	4.983	15.9	5.320	−6.75	31.0	2.399	51.86	52.9	−3.067	161.55
10	20.115	20.4	25.468	−26.62	38.9	24.596	−22.28	60.2	29.652	−47.41
11	27.191	20.8	27.243	−0.19	39.9	27.324	−0.49	60.3	30.051	−10.52
12	30.977	21.3	29.555	4.59	41.8	32.517	−4.97	62.0	37.526	−21.14
13	24.260	20.8	27.481	−13.27	40.5	29.067	−19.81	61.5	35.525	−46.43
14	33.169	21.8	31.842	4.00	42.3	34.018	−2.56	61.8	36.656	−10.51
15	34.886	23.0	37.274	−6.85	44.5	40.327	−15.60	64.7	49.854	−42.91
16	36.024	23.4	39.005	−8.27	45.8	43.870	−21.78	64.4	48.526	−34.71
17	34.594	22.7	36.036	−4.17	42.6	34.798	−0.59	59.2	25.142	27.32
18	31.852	23.5	39.698	−24.63	44.4	40.050	−25.73	63.6	44.555	−39.88
19	23.337	23.2	38.237	−63.85	44.4	39.959	−71.23	64.6	49.240	−111.00
20	21.174	23.1	37.790	−78.47	44.2	39.370	−85.94	64.8	50.133	−136.77
21	28.645	23.3	38.531	−34.52	44.0	38.892	−35.78	66.2	56.381	−96.83
22	29.472	23.2	38.302	−29.96	44.5	40.314	−36.79	66.7	58.612	−98.87
23	3.507	15.7	4.374	−24.72	31.2	2.840	19.00	51.6	−8.685	347.67
24	30.116	23.2	38.214	−26.89	45.5	42.934	−42.56	66.2	56.455	−87.46
25	27.806	22.5	35.220	−26.66	43.5	37.321	−34.22	63.9	45.893	−65.05
26	26.638	22.8	36.506	−37.04	44.3	39.586	−48.61	65.0	51.070	−91.72
27	29.817	23.3	38.822	−30.20	45.0	41.527	−39.27	62.5	39.937	−33.94
28	30.713	23.0	37.256	−21.30	43.2	36.437	−18.63	58.3	21.125	31.22
29	22.378	22.1	33.388	−49.20	43.9	38.529	−72.18	65.0	51.026	−128.02
30	24.605	21.7	31.576	−28.33	40.6	29.161	−18.52	64.7	49.687	−101.94

表 7　0—40 cm 土层硝态氮含量预测精度的分析

Table 7　Analysis of prediction accuracy of nitrate-nitrogen content in 0–40 cm soil layer

样点 Field	实测值 Measured value	氮平衡指数 N balance index (NBI)			Chl值 Chl value			SPAD值 SPAD value		
		测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)
1	6.083	16.6	7.590	−24.76	32.2	5.134	15.60	51.6	−2.208	136.29
2	16.555	19.5	18.049	−9.03	36.3	14.654	11.48	59.4	21.641	−30.73
3	20.256	20.2	20.764	−2.51	37.3	16.768	17.22	53.9	4.808	76.27
4	24.922	20.6	22.185	10.98	38.1	18.644	25.19	56.9	13.977	43.92
5	19.035	20.1	20.438	−7.37	37.4	17.049	10.43	55.8	10.498	44.85
6	26.563	22.1	27.784	−4.59	40.8	25.003	5.87	60.5	24.995	5.91
7	29.110	23.7	33.428	−14.83	43.6	31.356	−7.72	61.2	27.237	6.43
8	29.582	23.9	34.274	−15.86	43.6	31.437	−6.27	63.3	33.474	−13.16
9	4.619	15.9	5.089	−10.17	31.0	2.400	48.05	52.9	1.703	63.14
10	19.449	20.4	21.333	−9.69	38.9	20.658	−6.22	60.2	24.120	−24.02
11	22.158	20.8	22.764	−2.73	39.9	22.902	−3.36	60.3	24.393	−10.09
12	27.316	21.3	24.628	9.84	41.8	27.174	0.52	62.0	29.515	−8.05
13	22.588	20.8	22.955	−1.63	40.5	24.336	−7.74	61.5	28.144	−24.60
14	29.819	21.8	26.471	11.23	42.3	28.408	4.73	61.8	28.919	3.02
15	31.603	23.0	30.851	2.38	44.5	33.598	−6.31	64.7	37.961	−20.12
16	33.003	23.4	32.246	2.29	45.8	36.513	−10.64	64.4	37.052	−12.27
17	27.875	22.7	29.852	−7.09	42.6	29.051	−4.22	59.2	21.030	24.56
18	26.923	23.5	32.805	−21.85	44.4	33.370	−23.95	63.6	34.330	−27.51
19	22.756	23.2	31.627	−38.98	44.4	33.296	−46.32	64.6	37.541	−64.97
20	24.780	23.1	31.267	−26.18	44.2	32.812	−32.41	64.8	38.152	−53.96
21	27.716	23.3	31.864	−14.97	44.0	32.418	−16.96	66.2	42.433	−53.10
22	29.472	23.2	31.679	−7.49	44.5	33.588	−13.96	66.7	43.962	−49.16
23	4.334	15.7	4.326	0.17	31.2	2.763	36.25	51.6	−2.147	149.54
24	29.602	23.2	31.609	−6.78	45.5	35.743	−20.74	66.2	42.484	−43.52
25	24.306	22.5	29.195	−20.11	43.5	31.126	−28.06	63.9	35.248	−45.02
26	21.638	22.8	30.231	−39.71	44.3	32.989	−52.46	65.0	38.795	−79.29
27	23.658	23.3	32.099	−35.68	45.0	34.586	−46.19	62.5	31.167	−31.74
28	27.113	23.0	30.836	−13.73	43.2	30.398	−12.12	58.3	18.278	32.58
29	19.878	22.1	27.718	−39.44	43.9	32.120	−61.58	65.0	38.764	−95.01
30	23.605	21.7	26.257	−11.24	40.6	24.413	−3.43	64.7	37.847	−60.34

含量之间存在极显著的正相关关系，相关系数均达到 0.8 以上。并进行相关性模型的拟合，模型的决定系数 R^2 分别为 0.8072 (NBI)、0.7421 (Chl) 和 0.6931 (SPAD)。在可见光波段内植株叶片对光的反射率和吸收率受叶片中很多大分子物质的影响[7]，其中叶绿素的影响最大[32]。且叶片中的叶绿素含量与叶片的氮含量之间关系密切[33]。因而可通过 SPAD 叶绿素仪对叶片叶绿素含量进行表征，用来预测作物的氮素营养状况[11]。近年来已有大量研究表明，SPAD 值与作物叶片氮含量之间存在极显著的正相关关系[34-35]。还

表 8 0—60 cm 土层硝态氮含量预测精度的分析

Table 8 Analysis of prediction accuracy of nitrate nitrogen content in 0–60 cm soil layer

样点 Field	实测值 Measured value	氮平衡指数 N balance index (NBI)			Chl值 Chl value			SPAD值 SPAD value		
		测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)	测定值 Measured value	预测值 Predicted value	相对误差 RE (%)
1	5.549	16.6	6.436	−16.00	32.2	3.967	28.50	51.6	−3.259	158.74
2	16.532	19.5	16.667	−0.81	36.3	13.325	19.40	59.4	20.122	−21.71
3	20.772	20.2	19.323	6.98	37.3	15.402	25.85	53.9	3.619	82.58
4	24.171	20.6	20.713	14.31	38.1	17.246	28.65	56.9	12.608	47.84
5	18.992	20.1	19.004	−0.07	37.4	15.678	17.45	55.8	9.197	51.57
6	23.414	22.1	26.189	−11.85	40.8	23.497	−0.35	60.5	23.409	0.02
7	24.585	23.7	31.710	−28.98	43.6	29.742	−20.97	61.2	25.607	−4.16
8	25.719	23.9	32.537	−26.51	43.6	29.821	−15.95	63.3	31.722	−23.34
9	4.105	15.9	3.990	2.79	31.0	1.279	68.84	52.9	0.575	86.00
10	17.545	20.4	19.879	−13.30	38.9	19.226	−9.58	60.2	22.551	−28.53
11	20.711	20.8	21.279	−2.74	39.9	21.432	−3.48	60.3	22.819	−10.18
12	24.332	21.3	23.102	5.05	41.8	25.631	−5.34	62.0	27.840	−14.42
13	20.162	20.8	21.466	−6.47	40.5	22.841	−13.29	61.5	26.496	−31.41
14	23.994	21.8	24.905	−3.80	42.3	26.844	−11.88	61.8	27.256	−13.60
15	26.566	23.0	29.189	−9.88	44.5	31.946	−20.25	64.7	36.121	−35.97
16	26.783	23.4	30.554	−14.08	45.8	34.810	−29.97	64.4	35.229	−31.53
17	24.301	22.7	28.213	−16.10	42.6	27.475	−13.06	59.2	19.522	19.67
18	25.982	23.5	31.101	−19.70	44.4	31.721	−22.09	63.6	32.561	−25.32
19	19.769	23.2	29.949	−51.49	44.4	31.648	−60.09	64.6	35.709	−80.63
20	20.853	23.1	29.596	−41.93	44.2	31.172	−49.49	64.8	36.308	−74.12
21	19.995	23.3	30.181	−50.94	44.0	30.786	−53.97	66.2	40.505	−102.57
22	20.327	23.2	30.000	−47.58	44.5	31.935	−57.10	66.7	42.003	−106.63
23	3.698	15.7	3.244	12.27	31.2	1.636	55.76	51.6	−3.199	186.51
24	24.574	23.2	29.931	−21.80	45.5	34.054	−38.58	66.2	40.554	−65.03
25	21.115	22.5	27.569	−30.57	43.5	29.515	−39.78	63.9	33.460	−58.47
26	20.160	22.8	28.584	−41.78	44.3	31.346	−55.49	65.0	36.937	−83.22
27	21.331	23.3	30.410	−42.57	45.0	32.916	−54.31	62.5	29.460	−38.11
28	24.385	23.0	29.175	−19.65	43.2	28.800	−18.11	58.3	16.824	31.00
29	17.870	22.1	26.125	−46.20	43.9	30.492	−70.63	65.0	36.908	−106.53
30	20.249	21.7	24.696	−21.96	40.6	22.917	−13.17	64.7	36.008	−77.82

有研究认为，在一定施氮量范围内小麦叶片 SPAD 值与施氮量之间存在极显著的线性正相关；然而过多的氮肥施用，使作物处于饱和状态及叶绿素含量不再增加，导致 SPAD 值呈现下降的趋势[13]。然而，王婷婷等[36]研究表明，应用多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 测定的叶绿素 (Chl) 指标能准确的预测叶绿素含量，并且李振海等[37]研究认为，利用多酚-叶绿素仪 (Dualex-4) 测定的 Chl 指标对叶片中叶绿素的预测精度要高于 SPAD 指标。Cerovic 等[38]认为，SPAD 叶绿素仪的一个核心波段 (650 nm) 属于叶绿素的高吸

表 9　土壤硝态氮预测模型评价指标 ($df = 30$)

Table 9　Evaluation index of soil nitrate-nitrogen prediction model

诊断指标 Diagnostic index	土层深度 Soil depthbr (cm)	土壤硝态氮预测模型的验证 Verification of soil nitrate nitrogen prediction model					
		均方误差 MSE	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE	平均绝对百分比误差 MAPE (%)	标准均方根误差 nRMSE (%)	相关系数 r
氮平衡指数 N balance index (NBI)	0—20	48.88	6.99	5.61	23.37	27.35	0.8934**
	0—40	17.23	4.15	3.22	14.11	17.88	0.9116**
	0—60	30.15	5.49	4.35	20.94	27.07	0.8786**
Chl 值 Chl value	0—20	65.60	8.10	6.02	24.83	31.68	0.8581**
	0—40	28.44	5.33	4.05	19.53	22.98	0.8813**
	0—60	47.25	6.87	5.70	30.71	33.89	0.8259**
SPAD 值 SPAD value	0—20	284.23	16.86	14.42	76.01	65.94	0.6847**
	0—40	97.25	9.86	8.44	44.44	42.49	0.7469**
	0—60	127.98	11.31	9.57	56.57	55.77	0.6453**

注（Note）：**—$P < 0.01$.

收波段，高吸收波段能够提高叶绿素的测量精度，但当叶绿素浓度较高时存在饱和性问题而导致测量精度降低。而 Vogelmann[39]认为多酚-叶绿素仪 (Dualex-4) 的一个核心波段 (710 nm) 属于叶绿素的低吸收波段，可以降低叶绿素含量在高浓度下的饱和问题。并且此波段处具有“筛孔效应”(即叶片的光透射率高于均一样品的光透射率)，并且可以避免花青素的影响。Martinon[40]研究认为，与单独应用叶绿素和类黄酮相比，氮平衡指数 (NBI) 能降低叶片中叶绿素和类黄酮分布不均造成的误差，进而可以更好的预测作物的氮素营养状况。朱娟娟[41]研究得到，应用多酚–叶绿素仪测定的氮平衡指数 (NBI) 能较好地反映玉米氮素营养状况。本研究通过模型校验发现，棉花叶片全氮含量实测值与预测值的平均相对误差分别为–4.0% (NBI)、–3.1% (Chl) 和–5.7% (SPAD)，其中，NBI 与 Chl 对棉花叶片全氮含量预测的平均相对误差 (RE) 均达到了“优”的水平，而 SPAD 达到了“良”的水平。且 NBI氮平衡指数模型的均方误差 (MSE)、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 均优于 Chl 和 SPAD 模型。平均绝对百分比误差 (MAPE) 表现为：6.91%(NBI) < 9.37%(Chl) < 14.07%(SPAD)；nRMSE 与 MAPE 表现一致。说明利用氮平衡指数 (NBI) 能够较敏感的反映棉花叶片全氮含量。

3.3　氮素营养诊断指标与土壤硝态氮含量的关系

土壤中的无机氮 (NO_3^--N) 是作物主要吸取的速效养分[1]。因此，可利用速测手段通过对作物体内营养状况诊断，进而间接的反映土壤中的养分丰缺程度，并以此作为作物追肥决策的依据，提高环境效益。氮平衡指数 (NBI) 和 Chl 值与不同深度土壤硝态氮含量均达到极显著相关 ($P < 0.01$)。然而，对于 SPAD 模型而言：当 SPAD 值 < 57 时，不同深度土壤硝态氮含量与 SPAD 值之间相关性不显著；SPAD 值 ≥ 57 时，0—20 cm 和 0—40 cm 土壤硝态氮含量与 SPAD 的相关系数分别为 0.6404 和 0.5721，均达到极显著相关 ($P < 0.01$)；0—60 cm 土壤硝态氮含量与 SPAD 值之间在 0.05 水平存在显著相关。其中，氮平衡指数模型的决定系数均高于棉花 Chl 和 SPAD 模型。通过对土壤硝态氮实测值与预测值分析得出，Chl 和 SPAD 模型相对误差 (RE) 较大的值均高于 NBI 模型。进一步校验表明，NBI 模型的预测精度评价指标均优于 Chl 和 SPAD 模型。说明，NBI 对土壤硝态氮的预测精度较高。朱娟娟[41]研究发现，利用 SPAD 叶绿素仪和多酚仪 (Dualex-3) 的比值 (Chl / Phen) 对土壤中硝态氮含量的预测优于单独使用 SPAD 叶绿素仪和多酚仪 (Dualex-3)。Tremblay 等[42]提出，联合使用 SPAD 叶绿素仪与多酚仪 (Dualex-3)，采用 Chl / Phen 的比值与单独使用诊断指标相比能够较为敏感的预测土壤中的 NO_3^--N 含量。其原因有以下几点：1) 本研究是通过监测棉花叶片的氮素营养状况，间接的反映土壤硝态氮的变化，存在一些变异。2) 由于仪器自身工作原理的差异，并且在 3.2 中明确 NBI 对叶片 N 含量的预测精度较高；进而增加了对土壤养分预测的精确度。3) 由于 SPAD

的测量面积为 6 mm^2 (2 mm × 3 mm)，而多酚–叶绿素仪 (Dualex-4) 的测量面积为 19.6 mm^2 (直径 5 mm 的孔径)，测量时较小的测量面积容易受到叶片结构特征 (如叶脉) 的影响，会影响测试的准确性[43]。

此外，NBI 与 0—40 cm 土壤硝态氮模型的决定系数为 0.8304；然而，其它深度土壤硝态氮预测模型的决定系数均在 0.8 以下。通过模型校验分析，不同深度土壤硝态氮与 NBI 的相关系数分别为 0.8934 (0—20 cm)、0.9116 (0—40 cm) 和 0.8786 (0—60 cm)。且模型预测精度评价指标均表现为 0—40 cm 土壤硝态氮较低。其中，0—40 cm 土壤硝态氮预测模型的 MAPE 和 nRMSE 分别为 14.11% 和 17.88%。因此，氮平衡指数 (NBI) 能够较敏感的预测土壤中硝态氮含量，其中与 0—40 cm 土壤硝态氮含量的关系密切。

4 结论

氮平衡指数 (NBI) 能够较敏感的反映棉花叶片氮含量和 0—40 cm 土壤硝态氮含量。氮平衡指数对棉花叶片全氮含量的预测值与实测值的误差仅为 6.91%，对 0—40 cm 土壤硝态氮含量的预测误差为 14.11%。因此，可以满足新疆棉花滴灌条件下的养分快速诊断需求。

参 考 文 献：

[1] 董鹏. 棉花膜下滴灌氮素养分综合管理技术研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2011.
Dong P. Study on integrated management of nitrogen and nutrients in drip irrigation under cotton film[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2011.

[2] 秦子娴. 长期施肥中性紫色水稻土氮素矿化及氨氧化菌的分子生态学研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2014.
Qin Z X. Molecular ecology of nitrogen mineralization and ammonia oxidizing bacteria in long-term fertilization of neutral purple paddy soil[D]. Chongqin: MS Thesis of Southwest University, 2014.

[3] 张昊青. 黄土高原旱地麦田有机无机配施减氮增效作用研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2017.
Zhang H Q. Study on nitrogen reduction and synergism of organic and inorganic fertilizer in wheat field in dryland of loess plateau[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2017.

[4] 黄明. 基于收获期土壤测试和施肥位置优化的旱地小麦减肥增效研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2017.
Huang M. Research on fertilizer reduction and efficiency improvement of dryland wheat based on soil testing during harvest period and optimization of fertilization position[D]. Yangling, Shannxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2017.

[5] 侯秀玲, 张炎, 李磐, 等. 施氮对南疆潮土硝态氮分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 73–77, 84.
Hou X L, Zhang Y, Li P, *et al*. Effects of nitrogen application on the distribution of nitrate nitrogen in fluvo-aquic soil in southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(6): 73–77, 84.

[6] 田敏, 张泽, 陈剑, 等. 基于土壤硝态氮的滴灌春小麦氮素施肥模型建立研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(10): 1851–1856.
Tian M, Zhang Z, Chen J, *et al*. Establishment of a spring wheat nitrogen fertilization model based on soil nitrate nitrogen by drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014, 51(10): 1851–1856.

[7] 李鹏程, 刘爱忠, 刘敬然, 等. 使用叶绿素仪进行棉花氮营养诊断应注意的几个问题[J]. 中国棉花, 2014, 41(4): 38.
Li P C, Liu A Z, Liu J R, *et al*. Several issues that should be noticed in the diagnosis of cotton nitrogen nutrition using chlorophyll meter[J]. China Cotton, 2014, 41(4): 38.

[8] 李秋祝, 余常兵, 胡汉升, 等. 不同竞争强度间作体系氮素利用和土壤剖面无机氮分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 777–785.
Li Q Z, Yu C B, Hu H S, *et al*. Differences in nitrogen utilization and soil nitrogen distribution in soil profiles under different competition intensities[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(4): 777–785.

[9] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 等. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 73–80.
Xue L H, Luo W H, Cao W X, *et al*. Research progress on spectral diagnosis of crop moisture and nitrogen[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(1): 73–80.

[10] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 等. 冬小麦、夏玉米不同品种(系)之间的氮营养效率的差异[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 80–83.
Chen X P, Zhou J C, Wang X R, *et al*. Differences in nitrogen nutrition efficiency among different winter wheat and summer maize varieties (lines)[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 80–83.

[11] Tremblay N, Wang Z, Cerovic Z G. Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(2): 451–464.

[12] 潘薇薇. 应用叶绿素仪进行棉花氮素营养诊断[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2008.
Pan W W. Diagnosis of cotton nitrogen nutrition with chlorophyll meter[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2008.

[13] 史力超. 基于叶片SPAD值的滴灌春小麦氮肥分期推荐研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2016.
Shi L C. Nitrogen stage recommendation of spring wheat under drip irrigation based on leaf SPAD value[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2016.

[14] 蔡红光, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米叶片SPAD值、全氮及硝态氮含量的品种间变异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 866–873.
Cai H G, Mi G H, Chen F J, *et al*. Variations among varieties of SPAD value, total nitrogen and nitrate nitrogen content in corn leaves[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(4): 866–873.

[15] 王亚飞. SPAD值用于小麦氮肥追施诊断的研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2008.

Wang Y F. Study on SPAD value for diagnosis of topdressing nitrogen fertilizer in wheat[D]. Yangzhou, Jiangsu: MS Thesis of Yangzhou University, 2008.

[16] Richardson A D, Duigan S P, Berlyn G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. New Phytologist, 2002, 153(1): 185–194.

[17] Cartelat A, Cerovic Z G, Goulas Y, *et al*. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Field Crops Research, 2005, 91(1): 35–49.

[18] Tremblay N, Wang Z, Bélec C. Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(9): 1355–1369.

[19] Cerovic Z G, Cartelat A, Goulas Y, Meyer S. In-the-field assessment of wheat-leaf polyphenolics using the new optical leaf-clip Dualex [A]. Stafford J V. Precision agriculture[M]. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2005. 243– 250.

[20] 马春玥, 买买提·沙吾提, 依尔夏提·阿不来提, 姚杰. 新疆棉花种植业地理集聚特征及影响因素研究[J]. 作物学报, 2019, 45(12): 1859–1867.
Ma C Y, Maimat Sawut, Ershat Ablet, Yao J. Study on the characteristics and influencing factors of geographic agglomeration of cotton plantation in Xinjiang[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(12): 1859–1867.

[21] 罗新宁. 基于SPAD 的棉花氮素营养诊断及氮营养特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 2010.
Luo X N. Research on cotton nitrogen nutrition diagnosis and nitrogen nutrition characteristics based on SPAD[D]. Urumqi: MS Thesis of Xinjiang Agricultural University, 2010.

[22] 薛向荣, 杨涛, 马兴旺, 等. 棉花营养期倒四叶不同位点SPAD值与植株氮营养相关性[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 73–78.
Xue X R, Yang T, Ma X W, *et al*. Correlation between SPAD value of different positions on the top four leaves of cotton during vegetative period and nitrogen nutrition of plants[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(6): 73–78.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[24] 陕红, 张庆忠, 张晓娟, 等. 保存、分析方法等因素对土壤中硝态氮测定的影响[J]. 分析测试学报, 2013, 32(12): 64–69.
Shan H, Zhang Q Z, Zhang X J, *et al*. The influence of factors such as preservation and analysis methods on the determination of nitrate nitrogen in soil[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2013, 32(12): 64–69.

[25] 贺佳, 刘冰峰, 郭燕, 等. 冬小麦生物量高光谱遥感监测模型研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 313–323.
He J, Liu B F, Guo Y, *et al*. Study on the monitoring model of winter wheat biomass by hyperspectral remote sensing[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(2): 313–323.

[26] Khursheed A, Gaur R Z, Sharma M K, *et al*. Dependence of enhanced biological nitrogen removal on carbon to nitrogen and rbCOD to sbCOD ratios during sewage treatment in sequencing batch reactor[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171(2): 1244–1254.

[27] Li S X, Wang Z H, Hu T T, *et al*. Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. Advances in Agronomy, 2009, 101(8): 123–181.

[28] 沈阿林, 姚健, 刘春增, 等. 沿黄稻区主要水稻品种的需肥规律、叶色动态与施氮技术研究[J]. 华北农学报, 2000, 15(4): 131–136.
Shen A L, Yao J, Liu C Z, *et al*. Study on fertilizer requirement, leaf color dynamics and nitrogen application technology of main rice varieties along the yellow rice area[J]. Acta Agriculturae Boreali–Sinicca, 2000, 15(4): 131–136.

[29] 胡明芳, 田长彦, 吕昭智, 等. 氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, (4): 63–68.
Hu M F, Tian C Y, Lü Z Z, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer application rate on Xinjiang cotton yield and nitrate nitrogen content in plants and soil[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2006, (4): 63–68.

[30] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(25): 98–105.
Liu M X, Yang J S, Li X M, *et al*. Effects of drip irrigation mode on cotton root distribution and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(25): 98–105.

[31] 陈绍民. 基于土壤水分分布的滴灌棉花根系构型模拟方法研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2015.
Chen S M. Research on the simulation method of drip irrigation cotton root architecture based on soil moisture distribution[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2015.

[32] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J]. 棉花学报, 2002, 14(4): 209–214.
Wei C Z, Ma F Y, Lei Y W, *et al*. Study on root development of cotton under drip irrigation under film[J]. Cotton Journal, 2002, 14(4): 209–214.

[33] 张金恒, 王珂, 王人潮. 叶绿素计SPAD-502在水稻氮素营养诊断中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 177–180.
Zhang J H, Wang K, Wang R C. Application of chlorophyll meter SPAD-502 in rice nitrogen nutrition diagnosis[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2003, 31(2): 177–180.

[34] 谢华, 沈荣开, 徐成剑, 等. 水、氮效应与叶绿素关系试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2003, (8): 40–43.
Xie H, Shen R K, Xu C J, *et al*. Experimental study on the relationship between water and nitrogen effects and chlorophyll[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, (8): 40–43.

[35] 田永超, 朱艳, 曹卫星, 等. 利用冠层反射光谱和叶片SPAD值预测小麦籽粒蛋白质和淀粉的积累[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 808–813.
Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, *et al*. Using canopy reflectance spectra and leaf SPAD values to predict wheat grain protein and starch accumulation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(6): 808–813.

[36] 王婷婷, 常庆瑞, 刘梦云, 等. 基于Dualex植物多酚–叶绿素仪的冬小麦叶绿素含量高光谱估算[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5): 595–604.

Wang T T, Chang Q R, Liu M Y, *et al*. Hyperspectral estimation of chlorophyll content in winter wheat based on Dualex plant polyphenol-chlorophyll meter[J]. Journal of Triticeae erops, 2019, 39(5): 595–604.

[37] 李振海, 王纪华, 贺鹏, 等. 基于Dualex氮平衡指数测量仪的作物叶绿素含量估算模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 191–197.
Li Z H, Wang J H, He P, *et al*. Crop chlorophyll content estimation model based on Dualex nitrogen balance index measuring instrument [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 191–197.

[38] Cerovic Z G, Masdoumier G, Ghozlen N Ï B, *et al*. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids[J]. Physiologia Plantarum, 2012, 146(3): 251–260.

[39] Vogelmann T C. Plant tissue optics[J]. Annual Review of Plant Biology, 1993, 44(1): 231–251.

[40] Martinon V. Innovative optical sensors for diagnosis, mapping and real-time management of row crops: The use of polyphenolics and fluorescence[C]. Denver: International Conference for Precision Agriculture, 2010.

[41] 朱娟娟. 玉米氮素营养无损诊断及水氮效应[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学博士学位论文, 2012.
Zhu J J. Nondestructive diagnosis of nitrogen nutrition in maize and effects of water and nitrogen on maize[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2012.

[42] Tremblay N, Wang Z, Bélec C. Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 33(1): 57–70.

[43] Goulas Y, Cerovic Z G, Cartelat A, *et al*. Dualex: A new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence[J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4488–4496.