

基于高光谱的马铃薯水分亏缺状况实时监测

苏亚拉其其格^{1*}, 樊明寿², 贾立国², 祁 迷³, 杨彩平¹, 乌云敖日格拉¹

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要: 内蒙古自治区是全国马铃薯主产区之一, 降雨不足是限制该地区马铃薯生产的重要因子, 灌溉是获得高产的首要前提。但是当地水资源十分有限, 因此合理灌溉在马铃薯可持续发展中有着举足轻重的地位。对马铃薯进行非破坏性、快速、简洁的水分状况监测, 并据此进行灌溉量推荐十分必要, 而高光谱遥感技术就具备这一特点。为此, 从光合特性、冠层温度、叶片含水量和土壤含水量角度讨论了作物水分亏缺反映与高光谱反射特征关系, 综述高光谱实时诊断作物水分状况的研究进展, 并从马铃薯生产实践需求提出可行性研究内容, 以期为实现高产高效的马铃薯高光谱水分诊断及节水灌溉体系构建奠定基础。

关键词: 马铃薯; 高光谱; 反射率; 水分亏缺; 诊断

Real-time Monitoring of Water Deficit Status of Potato Based on Hyper-spectral Technology

SU Yalaqiqige^{1*}, FAN Mingshou², JIA Ligu², QI Mi³, YANG Caiping¹, WU Yunaorigela¹

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3. Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: Inner Mongolia Autonomous Region is one of the main potato producing areas in China. Rainfall is not sufficient there and irrigation is the first premise factor to obtain high yield. However, the local water resource is very limited, thus reasonable irrigation has a pivotal position in sustainable development of the potato production. Using hyper-spectral remote sensing is non-destructive, rapid and simple for crop water status monitoring and irrigation recommendation. To this end, the relationship between crop water deficit and high spectral reflectance was discussed from the aspects of photosynthetic characteristics, canopy temperature, leaf water content and soil moisture content, the study progress in hyper-spectral real-time diagnosis of crop water status was reviewed, and then some feasibility programs to potato production practice needs were proposed. These would be theoretical foundations for establishing high spectral moisture diagnostic system and water saving irrigation system of high yield and efficiency potato production.

Key Words: potato; hyper-spectrum; reflectivity; water deficit; diagnosis

收稿日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(31960388); 内蒙古自然科学基金(2018BS03002, 2018MS03018)。

作者简介: 苏亚拉其其格(1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为马铃薯水分与养分管理。

*通信作者(Corresponding author): 苏亚拉其其格, E-mail: qiqige608@163.com。

合理的水分供应是马铃薯获得高产及优质块茎的必要前提。然而, 内蒙古自治区(内蒙古)马铃薯种植的区域主要分布在干旱、半干旱地区, 这些区域的降水显然不能满足马铃薯整个生育期对水分的需求, 因而, 灌溉措施在保障内蒙古马铃薯生产中占据中心地位。另一方面, 内蒙古马铃薯种植地区的水资源十分有限, 由于不合理灌溉对水资源的开采, 多数灌溉种植区域地下水位下降严重, 部分种植喷灌圈集中的地区夏天频繁出现水井断水现象, 已经严重影响农作物的高产优质生产和农牧民的日常生活。在这样的背景下, 精准灌溉对于保障马铃薯高产、优质以及水资源的高效利用显得尤为重要。因此, 针对该地区水资源短缺实况, 及时准确监测马铃薯植株水分状况, 并根据缺水信息实施精量控制灌水, 不仅对该地区马铃薯水分高效管理极具现实意义, 且具有重要战略意义。

1 作物光谱反射率

高光谱遥感是一种在电磁波谱的可见光、近红外、中红外和热红外波段范围内获取许多非常窄的连续光谱数据的技术。其不仅有谱像合一的显著特征, 而且还能提供较高分辨率的连续光谱信息, 从而根据地表物体的光谱特性对其进行区分。地面非成像的高光谱仪在测量地物研究对象的光谱反射率时, 利用在自然环境下取得的实测数据, 建立高光谱植被估测模型, 进而提高不同植物高光谱数据的分析运用精度^[1]。在推动绿色农业迅速发展的当下, 对精准农业、农作物水肥诊断管理及产量监测等方面要有更先进的技术要求, 而高光谱遥感技术在很大程度上能够满足该技术需求, 且具有广泛的应用前景^[2]。

作物冠层结构是其地上部分各器官的数量与空间分布状态, 直接决定着对太阳光的截获量, 不仅影响作物群体的光合效率和产量^[3], 也是利用高光谱监测作物冠层信息的主要影响因子之一^[4]。因此, 利用高光谱识别植物体光谱反射特征使作物水分实时监测和快速诊断成为了可能, 也是实现大量农田作物水分状况非接触和无损监测方法的开拓。缺水时植物叶片症状较为明显, 在引起叶片颜色、形态结构一系列变化的基础上, 进而改变其光谱反射率^[5]。

棉花、大豆等作物在水分胁迫下近红外波段冠层反射率降低, 对水分敏感的光谱波段主要集中在 970, 1 450, 1 940 和 2 500 nm 左右^[6,7]。目前, 作物水分的高光谱诊断主要集中在将光谱分析的作物冠层结构数量化, 建立反映作物水分状况的最佳植被指数和光谱指数; 但水分胁迫下利用适宜的水分亏缺诊断指标, 进而构建实时精准的作物水分高光谱预测和诊断模型才是今后发展农业生产的主要研究方向。

2 作物水分亏缺诊断指标与光谱反射特征关系

2.1 光合特性

光合速率是植物光合作用的重要指标, 水分胁迫下植物叶片光合速率下降。作物净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn)与其气孔导度(Stomatal conductance, Gs)呈极显著相关, 相关系数大于 0.9^[8]。许多研究表明, 不同植物的光合速率与其相关性最佳的光谱变量值不同^[9-13]。油菜和水稻叶片净光合速率与比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)(R760, R766)呈显著线性相关^[9]; 水稻叶片 Pn 与 RVI 的线性关系良好^[10]; 玉米叶片归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)(即近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上二者之和)与 Pn、Gs 间存在较好相关性^[11]; 水分胁迫下, 春小麦 NDVI 值能反映其光合作用变化, 且对干旱有一定的敏感性^[12]。棉花两个品种的 NDVI、RVI 与 Pn、Gs 均达到显著和极显著相关, 相关性大小顺序呈 RVI > NDVI^[13]; 而修改型二次土壤调节植被指数(Modified second soil-adjusted vegetation index, MSAVI2), 即将裸土对于土壤调节植被指数(Soil adjusted vegetation index, SAVI)的影响降至最小的植被指数, 与其 Pn、Gs 的相关性大小介于 RVI 和 NDVI^[13]。蒸腾作用也是植物重要代谢环节, 其对水分胁迫的响应可能较光合速率更加敏感。蒸腾速率主要受气孔调节, 在干旱胁迫下植株通过降低气孔导度来限制蒸腾速率(Transpiration rate, Tr), 因此 Gs 和 Gs/Tr 变化可作为判断植物缺水程度的一个参考标准^[14]。

叶面积指数(Leaf area index, LAI)与作物光合作用和蒸腾作用密切相关, 是反映作物生长状况的重要指标^[15]。水分会直接影响作物叶面积指数的光

谱诊断能力。通过建立冬小麦不同生育时期叶面积指数高光谱监测模型,可提高其叶面积指数高光谱监测精度^[16]。目前,叶面积指数与NDVI相关性较高^[17],但NDVI不足之处为易受土壤类型干扰,且容易达到饱和值^[18];而土壤调整指数SAVI能有效消除土壤干扰因素影响^[19],红边抗水植被指数(Red-edge resistance water vegetable index, RRWVI)较常用植被指数具有更可靠的反演效果^[20]。

植物叶片色素则主要与光合作用相关,并与植株含水量共同作为响应干旱胁迫的良好指示剂^[21]。植物叶片色素主要有叶绿素(叶绿素a、b)和类胡萝卜素。在可见光范围内,作物光谱特征以吸收色素为主,因此光谱反射率与作物叶片色素显著相关^[22]。干旱胁迫下,玉米的叶绿素荧光参数与740 nm 荧光光谱峰值正相关^[23];棉花的一阶微分光谱在710~850 nm 与其叶绿素含量有较大相关性^[24]。

碳水化合物也可能是评价作物响应水分胁迫的重要指标之一,受水分影响较大^[25]。其中,非结构性碳水化合物(Non-structural carbohydrates, NSC)主要包括淀粉、蔗糖、可溶性总糖。干旱引起作物体内可溶性糖含量的增加^[26]。玉米体内可溶性糖含量能反映其水分状况,并与差值植被指数(Difference spectral index, DSI)的相关性最高($r = 0.99$);在不同水分胁迫下,玉米叶片可溶性糖含量与冠层光谱反射率变化趋势一致,高光谱可实时监测其叶片可溶性糖含量^[27]。

光合特性可作为水分状况及作物长势的监测指标,构建光合参数与高光谱植被指数之间的模型,为推荐灌水及估产方面提供可靠依据。

2.2 冠层温度

作物生长过程中,水分通过叶面蒸腾作用调节植株体温,因而作物冠层温度变化是反映土壤水分和作物水分状况的潜在指标,相关研究已证实冠层温度法诊断植株水分亏缺的理论^[28]。但此方法受环境影响极大,为克服该缺点,先后又提出日胁迫度指标(Stress degree day, SDD),即作物冠层温度(Canopy temperature, T_c)与气温(Air temperature, T_a)的差值、作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)、水分亏缺指数(Water deficit index, WDI)等^[29-31],并利用先进的高分辨率红外热图像系

统获取更为精确的作物冠层温度,应用到不同地区、不同作物的水分亏缺诊断研究^[32,33]。目前,红外热图像结合高光谱监测作物水分状况已形成较为成熟的估算作物冠层水分和推荐灌溉的技术^[34]。

缺水时,作物蒸腾速率降低,冠层温度随之增高,使冠气温差发生改变。作物冠气温差(ΔT :作物冠层温度与气温的差值)表示其冠层的水分与能量平衡,更好地反映作物水分状况,可作为水分亏缺诊断高效指标^[35]。一般认为,12:00~14:00是不同灌水条件下冠气温差差异显著的典型时刻^[36]。13:00~15:00的冠气温差可表征作物水分状况,而14:00的冠气温差可预测土壤水分变化,进而指导及时补水^[37]。土壤越干旱越会增大冬小麦冠气温差^[38],当差值大于 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为当时的灌溉指标^[39];差值 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水分开始亏缺,差值 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水分明显亏缺,差值 $\geq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则水分严重亏缺^[40]。同一作物不同生育时期的冠气温差临界值亦不同,水稻分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期冠气温差临界值分别为 -0.64 , 0.83 和 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[41]。通过冠气温差与光谱植被指数关系建立的WDI能够精确估算出大田苜蓿全覆盖和部分覆盖条件下的蒸腾速率^[30]。而冠气温差对叶片光合速率、蒸腾速率的差异区间则能诊断冬小麦水分亏缺程度,可作为保持叶片水分高效利用的依据^[36]。

基于冠层温度和冠气温差的作物水分监测具有快速、简便、无破坏等优势,但仍存在一定问题^[42]。鉴于此,有必要在生产实践中多方位试验与检验,为精确灌溉提供理论基础和技术支撑。

2.3 叶片(相对)含水量

植物生长发育直接受叶片水分程度的影响,叶片含水量能良好度量植株水分状况。李子、银胶菊的叶水势与水分胁迫指数显著线性相关^[43],因此叶片含水量通常被认为是诊断干旱胁迫的良好指标^[44]。水分胁迫下叶片相对含水量会下降,而叶片光谱反射率随含水量的降低而增加。800~2 500 nm 波段的光谱反射率可敏感反映作物叶片含水量以及相对含水量^[45,46],能作为地面遥感探测指标,有利于提出运用光谱反射率诊断作物叶片含水量的方法。研究表明,葡萄和小麦叶片相对含水量均与1 450 nm左右的吸收特征深度及面积呈显著线性正相关,可用于

其水分监测^[47,48]。冬小麦在780~805 nm的光谱反射率可表征其水分变化状态^[49]；而哈布热等^[50]发现，冬小麦整个生育期水分状况与650~775 nm波段密切相关，尤其在661和771 nm时最敏感；其中，拔节-抽穗期、抽穗-灌浆期的冬小麦冠层光谱反射率在750~1 075 nm处随植株含水量的增加而升高，灌浆-成熟期则在350~750 nm处随植株含水量的增加而降低。也有研究提出，950~970 nm的光谱反射率能较好地预测植物叶片相对含水量^[51]，由此证明不同植物或同一种植物不同生育时期的叶片含水量与其敏感波段范围不同。

基于上述不同作物水分敏感波段的筛选，构建出的植被指数或光谱指数能够有效克服单波段光谱预测精度较低的不足^[52]。如，水分指数(Water index, WI) = R_{970}/R_{900} 和700~800 nm的一阶导数最小值能够准确指示植物水分丰缺状况；而WI(900, 970)与NDVI(900, 680)比值指数则不仅预估植物叶片和冠层含水量，而且显著提高叶片含水量的预测精度^[53]。对单种作物而言，在水分敏感波段基础上进一步确立水分诊断指数的研究已有许多。水稻于短波红外1 400 nm左右和2 250 nm左右的波段比值及归一化组合下能被有效反映其叶片水分状况^[54]，并利用不同高光谱波段两两组合的比值光谱指数(Ratio spectral index, RSI)(R1 402, R2 272)和归一化光谱指数(Normalized difference spectral index, NDSI)(R1 402, R2 272)定量监测其叶片含水量^[55]；而估测小麦相对含水量的最佳光谱指数为RSI(R1 391, R1 830)和NDSI(R1 391, R1 830)^[56]，诊断其受水分胁迫程度的指标是地表湿润指数水分胁迫因子(Water stress_Land surface wetness index, Ws_LSWI)，即植被冠层中水分含量^[57]。充分证明不同作物的水分监测最佳光谱指数对于干旱胁迫程度的敏感性不同。

2.4 土壤含水量

土壤含水量与叶片相对含水量呈线性相关，其对植物生长发育的影响是间接的，但从本质上反映作物缺水程度，是最为常见的水分诊断指标^[58]。通常认为，田间持水量的75%为充足供水、60%为适度供水、45%为水分亏缺，并根据不同作物各个生育时期对土壤水分的需求规律不同而进行适当调

控。作物能够吸收利用的土壤水量称为土壤有效含水量(即田间持水量与凋萎系数之间的土壤含水量)，其小于0.75~0.80时作物受到土壤水分胁迫。土壤水势也是作物灌水控制指标，可应用到作物高产高效灌溉模式的建立^[59]。

高光谱能大范围、实时反映土壤水分状况，对田间土壤含水量的诊断极具优势。作物水分胁迫指数(CWSI)不仅监测土壤水分状况^[60]，还能指示作物受水分胁迫的程度，在落花生的分枝期和花针期CWSI为0.46~0.49^[61]。冬小麦整个生育期植株含水量与其优化土壤调节植被指数(Optimization of soil-adjusted vegetation index, OSAVI)拟合最佳，说明作物本身具有反映土壤水分胁迫程度的能力^[50]。在生产实践中应实时、精确判断土壤含水量，进行适时适量灌水，从土壤含水量角度为作物水分亏缺诊断提供可靠依据^[62]。在此过程中，还需考虑不同土壤条件下作物对深层水的利用能力差异性，不断探索改善基于土壤含水量的水分监测植被指数和水分指数。

3 高光谱遥感监测作物水分状况研究进展

作物水分的光谱监测以作物水分含量为基础来进行，常用上述水分诊断指标与光谱参数的相关关系表征水分状况，即通过筛选作物水分敏感波段并构建相关特征光谱参数，从而构建作物水分亏缺诊断的光谱监测模型。该研究最早始于20世纪70年代初，从水分敏感波段和光谱参数关系角度开展并初步证明叶片的红外光谱反射率随冠层含水量的下降而增加^[63]。国内也有研究发现，干旱胁迫的加重会引起可见光区和短波红外光区反射率升高，而近红外区反射率下降^[12]。此后，一些研究中进一步证明能反映植物水分状况的敏感波段范围分别在950~970, 1 450, 1 940和2 500 nm处^[64,65]。为了有效降低背景噪音、强化相关性能，对原始光谱进行导数处理，进而提出了诊断植物水分信息的一阶导数波段，分别为：730, 960, 1 015~1 050, 1 145和1 330 nm^[66,67]。国内外学者又相继构建了众多作物水分监测的光谱指数，如对植被含水量敏感的水分胁迫指数($MSI = R_{1600}/R_{820}$)、归一化差值水分指数($NDWI = [R_{860} - R_{1240}]/[R_{860} + R_{1240}]$)、水分

指数($WI = R970/R900$)等^[64,68]。在作物冠层, $R(610, 560)/ND(810, 610)$ 是判断小麦植株水分状况的良好光谱植被指数^[69], 而比值植被指数($R810/R460$)能较好地监测水稻不同生育时期的叶片与植株含水量^[70], 比值植被指数 $R960/R560$ 与甘蔗土壤含水量呈极显著正相关^[71]。综上所述, 高光谱遥感技术估测冠层水分状况的研究已在许多作物上取得了一系列成果, 但是基于高光谱的马铃薯水分诊断模型研究未见。

4 高光谱诊断马铃薯水分状况的可行性分析

目前, 马铃薯植株冠层光谱反射率研究主要集中在对其病害预防及外部缺陷的检测, 而利用高光谱数据筛选特征光谱并进一步构建马铃薯水分监测指数的研究还未见报道。内蒙古农业大学马铃薯高产高效创新团队对马铃薯非充分灌溉及适度干旱胁迫的增产效果方面已有相应的研究。马铃薯整个生育时期优化出最适土壤相对含水量下限: 苗期55%, 块茎形成期76%, 块茎膨大期77%, 淀粉积累期58%^[72]。同时提出, 马铃薯苗期适度水分亏缺(最大田间持水量的50%)能促进其合理的群体结构构建及物质分配, 从而利于块茎产量的提高, 主要原因为马铃薯存在苗期水分亏缺后复水的补偿效应; 但马铃薯块茎形成期对水分亏缺最敏感, 不存在复水后的补偿效应, 从而该生育时期缺水对块茎产量造成的损失最大^[72,73]。基于此, 需要建立最简便、快速的水分监测指标体系, 实时反馈土壤含水量和马铃薯水分状况, 并根据优化的马铃薯最适土壤含水量进行及时、精量灌水, 真正做到节水的同时能提前预防水分胁迫引起的马铃薯减产。为此, 应采用目前较为先进的高光谱仪, 对不同土壤供水情况下的马铃薯冠层光谱特征进行观测和分析, 结合植株和土壤水分含量以及高光谱信息, 研究马铃薯水分表征参数与其相对应的高光谱特征参数关联, 筛选高光谱监测马铃薯植株水分状况的最佳水分光谱指数; 并利用其与马铃薯关键生育时期的植株冠层含水量、土壤含水量的精确定量关系, 建立马铃薯各生育时期的高光谱水分诊断和推荐灌溉模型。为高产高效的马铃薯高光谱水分诊断体系构建奠定坚实可靠基础。

[参 考 文 献]

- [1] 方红亮, 田庆久. 高光谱遥感在植被监测中的研究综述 [J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 62-69.
- [2] 唐延林, 黄敬峰. 农业高光谱遥感研究的现状与发展趋势 [J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(4): 248-251.
- [3] 胡延吉, 兰进好. 不同时期小麦主栽品种冠层结构研究 [J]. 中国农业气象, 1999, 20(1): 11-14.
- [4] Stewart D W, Costa C, Dwyer L M, *et al.* Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(6): 1465-1474.
- [5] 周学秋, 朱雨杰, 严衍禄. 生育阶段小麦冠层的反射光谱特征及其模糊聚类研究 [J]. 激光生物学, 1996(3): 870-873.
- [6] Holben B N, Schutt J B, McMurtrey J. Leaf water stress detection utilizing the matic mapper bands 3,4 and 5 in soybean plants [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 289-297.
- [7] Jackson R D, Ezra C E. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(1): 177-185.
- [8] Inamullah K, Isoda A. Adaptive responses of soybean and cotton to water stress: II. Changes in CO_2 assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature [J]. *Plant Production Science*, 2005, 8(2): 131-138.
- [9] 雷利琴. 基于冠层反射光谱的油菜光合及生长监测 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [10] 田永超. 基于冠层反射光谱的水稻水分及稻麦生长监测 [D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [11] 仇亚红, 杨峰, 赵刚成, 等. 玉米穗位叶主要光合荧光参数与高光谱数据的相关分析 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(24): 71-77.
- [12] 王小平, 郭锐, 李耀辉, 等. 黄土高原半干旱区春小麦冠层光谱对不同程度水分胁迫的响应 [J]. 兰州大学学报, 2014, 50(3): 418-423.
- [13] 郭晓飞, 黄春燕, 田春燕, 等. 不同水分处理条件下棉花高光谱植被指数与光合参数的相关分析 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54(1): 20-26.
- [14] 陈家宙, 吕国安, 何圆球. 土壤水分状况对花生和早稻叶片气体交换的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 105-110.
- [15] Li Z W, Xin X P, Tang H, *et al.* Estimating grassland LAI using the random forests approach and landsat imagery in the meadow steppe of Hulunber, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*,

- 2017, 16(2): 286–297.
- [16] 贺佳, 刘冰峰, 李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 141–150.
- [17] Gitelson A A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation [J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(2): 165–173.
- [18] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158–182.
- [19] Huete A R, Jackson R D, Post D F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(1): 37–53.
- [20] 束美艳, 顾晓鹤, 孙林, 等. 基于新型植被指数的冬小麦 LAI 高光谱反演 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3486–3496.
- [21] Yang H, Zhang J, Van Der Meer F, *et al.* Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon micro-seepage [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(1): 197–202.
- [22] 唐延林, 黄敬峰, 王秀珍, 等. 玉米叶片高光谱特征及与叶绿素、类胡萝卜素相关性的研究 [J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 71–76.
- [23] 张永江, 赵春江, 刘良云, 等. 被动荧光探测水分胁迫对玉米叶片影响的初步研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 39–43.
- [24] 冯先伟, 陈曦, 包安明, 等. 水分胁迫条件下棉花生理变化及其高光谱响应分析 [J]. 干旱区地理: 汉文版, 2004, 27(2): 250–255.
- [25] Lu J Y, Shan L, Gao J F. Effects of distribution of fore-anthesis carbon assimilates of wheat under soil dry-wet alternation [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(9): 1565–1569.
- [26] Zrenner R, Stitt M. Comparison of the effect of rapidly and gradually developing water-stress on carbohydrate metabolism in spinach leaves [J]. Plant, Cell and Environment, 2010, 14 (9): 939–946.
- [27] 王仲林, 谌俊旭, 程亚娇, 等. 干旱胁迫下玉米叶片可溶性糖光谱估测研究 [J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(4): 436–443.
- [28] Tanner C B. Plant temperature [J]. Agronomy Journal, 1963, 55 (2): 210–211.
- [29] Idso S B, Jackson R D, Pinter P J Jr, *et al.* Normalizing the stress degree day for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 45–55.
- [30] Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J. A reexamination of the crop water stress index [J]. Irrigation Science, 1988, 9(4): 309–317.
- [31] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246–263.
- [32] 蔡焕杰, 康绍忠, 熊运章. 用冠层温度计算作物缺水指标的一种简化模式 [J]. 水利学报, 1996(5): 44–49.
- [33] Yuan G, Luo Y, Sun X, *et al.* Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(1): 29–40.
- [34] 肖莉娟, 王登伟, 黄春燕, 等. 基于冠层温度棉花水分胁迫指数与高光谱植被指数的关系 [J]. 新疆农业科学, 2013, 50(9): 1577–1582.
- [35] 柴强. 节水灌溉水分诊断指标研究现状与展望 [J]. 现代农业科技, 2006(12): 102–104, 106.
- [36] 魏征, 许迪, 刘钰, 等. 基于冠气温差的冬小麦水分亏缺诊断试验研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(8): 984–990.
- [37] 刘婵, 范兴科. 基于冠层叶-气温差的温室土壤水分诊断 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 90–93.
- [38] 董振国. 农田作物层温度初步研究——以冬小麦、夏玉米为例 [J]. 生态学报, 1984, 4(2): 33–40.
- [39] 蔡焕杰, 康绍忠. 棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究 [J]. 灌溉排水, 1997, 16(1): 1–5.
- [40] 石培华, 冷石林, 梅旭荣, 等. 冠层-气温差监测和诊断冬小麦农田水分 [J]. 中国农业气象, 1995, 16(2): 13–15.
- [41] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 等. 节水灌溉条件下水稻叶气温差变化规律与水分亏缺诊断试验研究 [J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1503–1508.
- [42] 张寄阳, 段爱旺, 孙景生, 等. 作物水分状况自动监测与诊断的研究进展 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 174–178.
- [43] Intrigliolo D S, Castel J R. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees [J]. Tree Physiology, 2006, 26(3): 303–311.
- [44] De Jong S M, Addink E A, Hoogenboom P, *et al.* The spectral response of *Buxus sempervirens* to different types of environmental stress—A laboratory experiment [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 74: 56–65.
- [45] Seelig H D, Hoehn A, Stodieck L S, *et al.* The assessment of leaf

- water content using leaf reflectance ratios in the visible, near, and short-wave-infrared [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(13): 3701–3713.
- [46] Colombo R, Meroni M, Marchesi A, *et al.* Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1820–1834.
- [47] 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究 [J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1): 104–107.
- [48] Gonzalez – fernandez A B, Rogroguet J R, Marcelo V, *et al.* Using field spectrometry and a plant probe accessory to determine leaf water content in commercial vineyards [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 156: 43–50.
- [49] 韩刚. 基于高光谱的小麦植株水分状况监测研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [50] 哈布热, 张宝忠, 李思恩, 等. 基于冠层光谱特征的冬小麦植株含水率诊断研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(10): 9–15.
- [51] Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M. Non – destructive estimation of water status on intact crop leaves based on spectral reflectance measurements [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1993, 62(3): 462–469.
- [52] Ceccato P, Flasse S, Gregoire J M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(2–3): 198–207.
- [53] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, *et al.* Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (r900/r970) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869–2875.
- [54] 孙俊, 毛罕平, 羊一清, 等. 基于冠层光谱特性的水稻叶片含水率模型 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 133–136.
- [55] 刘小军, 田永超, 姚霞, 等. 基于高光谱的水稻叶片含水量监测研究 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(3): 435–442.
- [56] Das B, Sahoo R N, Krishna G, *et al.* Wheat phenomics through hyper – spectral remote sensing for water deficit stress [C]//3rd International Plant Physiology Congress. New Delhi, India, 2015.
- [57] Dangwal N, Patel N R, Kumari M, *et al.* Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from landsat – tm [J]. *Geocarto International*, 2016, 31(6): 682–693.
- [58] 中国农业科学院. 中国农业气象学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 74–75.
- [59] 杨建昌, 王维, 王志琴, 等. 水稻旱秧大田期需水特性与节水灌溉指标研究 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 34–42.
- [60] KÖksala E S, Kodal S, üstun S, *et al.* Estimation of dwarf green bean water use under semi-arid climate conditions through ground – based remote sensing techniques [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(2): 353–360.
- [61] Kar G, Kumar A. Surface energy fluxes and crop water stress index in groundnut under irrigated ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1–2): 94–106.
- [62] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增, 等. 作物水分亏缺诊断研究进展 [J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 205–210.
- [63] Thomas J R, Namken L N, Oerther G F, *et al.* Estimating leaf water content by reflectance measurements I [J]. *Agronomy Journal*, 1971, 63(6): 845–847.
- [64] Hunt E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near – and middle – infrared reflectances [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 43–54.
- [65] Deng R, He Y, Qin Y, *et al.* Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum(900–2500 nm) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 192–206.
- [66] Shibayama M, Akiyama T. Seasonal visible, near-infrared and mid – infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27(2): 119–127.
- [67] 梁亮, 张连蓬, 林卉, 等. 基于导数光谱的小麦冠层叶片含水量反演 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46(1): 18–29.
- [68] Gao B C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257–266.
- [69] 田永超, 朱艳, 曹卫星, 等. 小麦冠层反射光谱与植株水分状况的关系 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2072–2076.
- [70] 田永超, 曹卫星, 姜东, 等. 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与植株含水率的定量关系 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 318–323.
- [71] 汪沛, 李就好, 周志艳. 不同土壤水分状况下甘蔗冠层光谱特征研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(1): 34–37.
- [72] 石晓华. 非充分灌溉对滴灌马铃薯生长发育规律及养分利用效率的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [73] 乌兰. 水分亏缺对马铃薯生长发育、激素变化及块茎产量的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.