

高光谱的草本植物水分含量检测模型构建

赵阳¹, 成晨¹, 杨璐璐², 余新晓²

1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 中国水利水电科学研究院, 北京 100048
2. 北京林业大学, 北京 100083

摘要 基于高光谱开展植物水分盈亏检测是当前植物生理学研究的热点。羊茅草是我国北方草坪使用量最大的草本植物之一, 其生长对水分需求量大, 水分亏缺会使其叶片颜色、纹理、形态等物理特征和组织生理特性发生系列变化。开展基于高光谱的草本植物水分含量检测模型构建, 可实现对羊茅草等草本植物水分盈亏状况的快速无损监测, 利于全面、可靠的诊断草本植物水分状况并及时采取应对措施, 为预测未来气候变化下北方常见草本植物生理响应及变化过程提供重要依据。以北方使用量最大的草本植物——羊茅草为例, 采用盆栽控制实验法开展基于高光谱的植物水分含量观测模拟实验研究。实验在恒温恒湿培养箱中进行。经查阅有关文献, 该实验共设置空气 CO₂ 浓度(CX)(包括 400 和 700 μmol · mol⁻¹ 两个梯度)和土壤持水量(WX)(包括: 100%田间持水量, 40%田间持水量, 20%田间持水量三个梯度)两个变量, 共六种不同情景; 在不同情景条件下, 借助 ASD Field Spec HandHeld 光谱仪于每天 10:00—14:00 测定羊茅草叶片光谱反射参数, 主要包括: 光谱反射率(R_i)、一阶导数光谱(Dλ_i)、红边幅值(Dλ_r)、红边位置(λ_r)、红谷吸收深度(D)、红边面积(S_r)、光化学反射指数(PRI)、叶绿素指数(Rch)、归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、归一化光谱指数(NDSI)、比值光谱指数(RSI)、分形维数(Fd)等。通过采集不同情景下植物光谱反射参数, 采用多元线性逐步回归分析、方差分析、数学统计模型构建等多种方法, 探讨不同生境条件下羊茅草叶片水分含量与光谱反射率(R_i)、红边幅值(Dλ_r)、红边面积(S_r)等光谱参数之间的量化关系, 筛选出可以用于检测羊茅草水分含量状况的最优光谱特征参数, 并构建了基于高光谱的羊茅草水分含量检测模型公式。研究表明: 归一化植被指数(NDVI)、叶绿素指数(Rch)、分形维数(Fd)与羊茅草叶片含水量之间相关性在 99%置信水平上达到极显著水平(p<0.01), 且对于不同土壤水分胁迫条件下的羊茅草长势分辨效果较好, 是监测羊茅草水分含量的有效参数和最优参数。同时发现, 羊茅草叶片水分含量(Y)与诸多光谱特征参数(X)之间具有良好的多元线性关系, 拟合得到羊茅草水分含量检测模型公式为: $Y = -0.125X_{Rch} + 1.714X_{NDVI} - 0.023X_{Fd} + 0.018$, 相关系数平方(R²)达到 0.89, 通过 F 检验, 模型检验达到极显著水平(F=15.588>7.21, p<0.01), 说明建立的回归模型具备统计学意义, 可以用于羊茅草水分含量检测。为快速便捷且准确无损的监测羊茅草受旱程度, 指导大面积草坪灌溉和管理等提供; 重要的技术支撑, 对于丰富植被水分光谱探测研究具有重要理论与实践意义。

关键词 光谱; 水分盈亏; 统计模型; 评估

中图分类号: S132 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0894-05

引言

大气 CO₂ 浓度上升, 降水量减少及分配不均等引发的气候暖干化是当前全球气候变化的主要表现形式。植物光合作用作为陆地生态系统物质与能量循环的重要环节, 在受植物自身生长状况影响的同时, 气候变化背景下的外部光热条件

改变势必会对植物光合作用及其光谱特征等产生重要影响^[1-2]。一方面, 大气 CO₂ 浓度升高和气候干旱导致的土壤水分持续亏缺会对植物光合作用等生理生态过程造成影响, 进而导致作物产量或生物量发生改变^[3]。另一方面, 不同生境条件下, 植被因色素含量、细胞结构、含水量改变而导致植物光谱特征存在一定差异^[4]。近年来, 随着高光谱遥感技术在植物生长状况及其水分胁迫程度动态监测等方面的广泛

收稿日期: 2018-02-07, 修订日期: 2018-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501041), 江西省水利科技项目(KT201404)资助

作者简介: 赵阳, 1986年生, 中国水利水电科学研究院高级工程师 e-mail: zhaoyang1224@163.com

应用,气候暖干化背景下植物生理生态响应研究又增加了新的技术手段^[5]。

因此,基于高光谱探究气候变化条件下植物水分盈亏等生理特征参数变化趋势,能在丰富植被生长状况监测技术同时,实时动态监测植物受旱程度、预测植物对未来气候变化条件下的变化特征。国内外学者在应用高光谱图像检测植物含水量等方面进行了诸多探索^[6]。刘小军等^[7]研究表明高光谱可用于水稻叶片含水量的定量监测;梁亮等^[8]认为导数光谱可实现小麦冠层叶片含水量信息的准确估测;吴龙国等^[9]认为 NIR 高光谱成像技术提取特征波长进行红枣水分检测是可行的。以往研究多集中于农作物生理特征对气候变化响应规律的探讨,气候变化背景下基于高光谱的草本植物受旱程度评估研究较少,且多定性分析,缺乏定量讨论。

羊茅草是国内使用量最大的冷季型草坪草之一,在我国北方大面积分布。开展气候变化背景下基于光谱技术的羊茅草水分盈亏监测指标筛选研究,实现利用高光谱对羊茅草草坪草水分、生长状况的快速评估,对有效地指导草坪灌溉和管理具有重要实际意义。本研究采用控制实验法模拟不同 CO₂ 浓度和水分胁迫下羊茅草光谱特征与生理生态响应,筛选用于预测羊茅草水分含量的光谱特征参数,并基于生理特征参数与光谱特征量化关系构建羊茅草水分含量检测模型,为实现大面积羊茅草草坪草受旱程度评价提供技术支持。

1 实验部分

1.1 材料

选取羊茅草(*Festuca arundinacea*) Arid III 号为试验对象,该草种属禾本科,禾本科多年生地被植物,茎圆形,直立,粗壮,簇生。叶鞘圆形,光滑或有时粗糙,开裂,边缘透明,基部红色。鉴于该植物适应性强,出苗快,幼苗活力强,具有非常好的耐热、抗旱性能,形成的草坪质地细腻、草坪覆盖度大、密度高,故而大量应用于运动场草坪和防护草坪,在我国华北、东北等地区广泛分布。

1.2 控制实验

采取羊茅草盆栽变量控制实验法开展模拟研究,整个实验选择在羊茅草抽穗期(4月—9月)进行。首先于4月选取长势相近的羊茅草样本,分别移植至九个花盆内(每盆20株);5月将样本花盆移植至 FH-230 恒温恒湿培养箱中进行模拟实验。整个实验过程要求控制光照、湿度以及温度等环境因子与北京市近 2010 年—2014 年同期平均水平一致。实验控制变量主要包括:CO₂ 浓度(CX)和土壤持水量(WX)。其中,CO₂ 浓度(CX)设置 2 个梯度(400 和 700 μmol·mol⁻¹),土壤含水量(WX)设置 3 个梯度(20%, 40% 和 100%田间持水量),由称重法进行含水量控制,每种处理设置三个重复。变量组合见表 1。

表 1 CO₂ 浓度和水分梯度组合情况

Table 1 CO₂ concentration and soil moisture gradient in the experiment

| 情景 | W1: 100%(田间持水量) 水分充足 | W2: 40%(田间持水量) 中度干旱 | W3: 20%(田间持水量) 重度干旱 |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| C1: 400 μmol·mol ⁻¹ | C1W1 | C1W2 | C1W3 |
| C2: 700 μmol·mol ⁻¹ | C2W1 | C2W2 | C2W3 |

表 2 生理特征指标表

Table 2 Description of physiological characteristics

| 测定指标 | 测量仪器 | 测量时段 | 测定部位 | 重复次数 | 备注 |
|--------------------------------------|-------|-------------|------|------|--|
| 叶片含水量/% (leaf water content, LWC) | 烘干法称重 | 10:00—14:00 | 叶片 | 3 | LWC=(FW-DW)/FW×100% (FW 为叶片鲜重/克, DW 为叶片干重/克(鲜叶片置于烘箱内 105 °C, 烘干 24 h 后计叶片干重)) |

1.3 叶片含水量指标获取

叶片含水量指标数据采集体于羊茅草抽穗期(5月—9月),每月 10 日、20 日和 30 日定期采样,采样周期为 10 d。指标采集标准见表 2。

1.4 光谱数据获取

采用 ASD Field Spec HandHeld 光谱仪(Analytical Spectral Device, US, 波段值为 300~1 100 nm, 光谱分辨率 3 nm, 采样间隔 0.6 nm),于每天 10:00—14:00 测定叶片光谱反射参数。为保证光谱仪探头视野范围全部落在阳光下的样本叶片上,光谱仪传感器探头垂直向下,距草本冠层顶垂直高度约 0.7 m,视场角为 25°。每次测量前使用标准白板进行校正,每次测定 3 次取平均值作为测量定值,光谱特征参数

主要包括:光谱反射率(R_i)、一阶导数光谱($D\lambda_i$)、红边幅值($D\lambda_r$)、红边位置(λ_r)、红谷吸收深度(D)、红边面积(S_r)、光化学反射指数(PRI)、叶绿素指数(Rch)、归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、归一化光谱指数(NDSI)、比值光谱指数(RSI)、分形维数(Fd)等,具体计算方法参见相关文献。

2 结果与讨论

2.1 不同模拟条件对羊茅草光谱特征的影响

2.1.1 不同条件下羊茅草光谱反射率变化

由图 1(a)可知,不同生境下羊茅草光谱反射率(R_i)曲线

在 380~1 000 nm 波长范围内整体变化趋势大致相似, 具有一般绿色植物的特征, 但考虑生境不同, 不同情景下光谱反射率曲线又存在一定差异。其中, 在 550 和 700 nm 波长附近, 存在反射率在 10% 左右的反射绿峰和反射率在 5% 左右的红光低谷。受干旱胁迫影响, 光谱绿峰高度 (H) 和红光谷深度 (D) 分别平均下降 15.2% 和 8.5%。在 760~980 nm 范围内存在反射率高达 40% 以上的反射高原区 [图 1(b)]。图 1

(c)和(d)对比可知, 在可见光波段, 低 CO_2 浓度情景下, 羊茅草叶片光谱反射率总体偏低。其中, 重度干旱胁迫下, 叶片反射率明显偏低。在高 CO_2 浓度情景下, 光谱反射率受干旱胁迫影响较小。在近红外波段, 低 CO_2 浓度重度干旱胁迫条件下, 叶片光谱反射率明显降低, 这与龙光强^[10]研究结果一致。其他生境条件下考虑不同 CO_2 浓度和干旱胁迫产生的交互作用, 叶片光谱反射率差异不大。

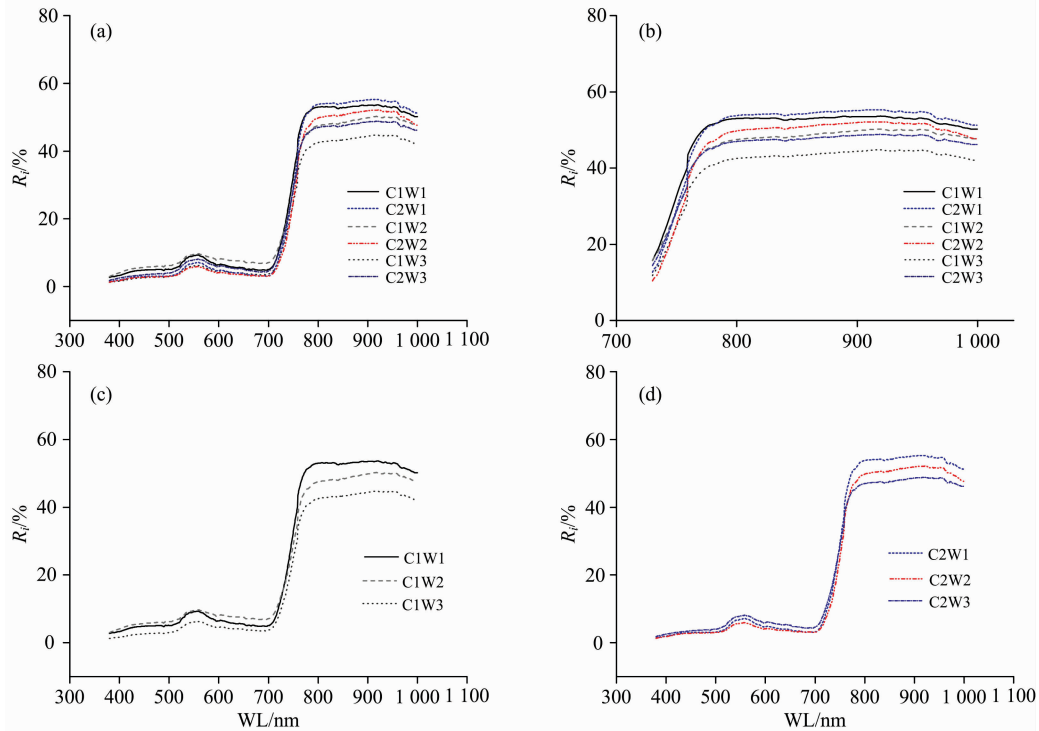


图 1 不同 CO_2 浓度和土壤水分处理下羊茅草的光谱反射曲线

Fig. 1 Hyperspectral reflectance curves of Fescue under different CO_2 concentrations and soil water supply

2.1.2 不同 CO_2 浓度和干旱胁迫下羊茅草红边特征变化

“红边”现象是植物光谱曲线最明显特征, 植物缺水时, 红边位置会发生明显变化, 开展植物红边特征变化分析对了解植物水分状况具有重要指示意义。由表 3 可知, 在 CO_2 浓度由 700~400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 变化过程中, 干旱胁迫使羊茅草反射曲线的红边位置 (λ_r) 发生“蓝移”, 即向短波方向移

动; CO_2 浓度升高后, 反射曲线的红边位置受干旱胁迫影响较小。不同情境下红边斜率 ($D\lambda_r$)、红边面积 (S_r) 变化具体表现为: 低 CO_2 浓度时, 随轻度干旱上升, 重度干旱下降; 高 CO_2 浓度时, 轻度干旱下降, 重度干旱上升。红边次峰斜率 ($D\lambda_{sr}$) 与 $D\lambda_r$ 变化规律相似, 但区分度高于 $D\lambda_r$, 说明可以更加明确地反映羊茅草反射光谱的红边参数特征。

表 3 不同 CO_2 浓度和土壤水分条件下羊茅草的光谱反射参数

Table 3 Reflectance spectra red edge parameters of Fescue under different CO_2 concentration and soil moisture gradient

| 处理 | λ_r | $D\lambda_r$ | S_r | $D\lambda_{sr}$ |
|------|-------------|--------------|--------|-----------------|
| C1W1 | 752.31 | 0.942 | 40.325 | 0.775 |
| C1W2 | 751.74 | 0.943 | 43.023 | 0.822 |
| C1W3 | 751.73 | 0.854 | 35.099 | 0.726 |
| C2W1 | 752.31 | 0.982 | 43.945 | 0.801 |
| C2W2 | 752.31 | 0.904 | 36.832 | 0.758 |
| C2W3 | 752.31 | 0.976 | 42.957 | 0.796 |

2.2 不同 CO_2 浓度和干旱胁迫对羊茅草叶片含水量的影响

由图 2 可知, 不同 CO_2 浓度和干旱胁迫下羊茅草叶片含水量变化区分度较高。其中, 低 CO_2 浓度下, 羊茅草叶片含水量 (LWC) 随土壤含水量降低而呈现明显的减少趋势, 减幅达 9.6%。相反的, 在高 CO_2 浓度下, 羊茅草叶片含水量 (LWC) 随土壤含水量降低而呈现小幅增加, 这与高二氧化碳浓度可以导致叶片气孔阻力增加, 蒸腾速率下降密切相关, 同时也说明高二氧化碳浓度可以抵消干旱胁迫给植物生长带来的负效应, 进而利于保持叶片含水量。

2.3 羊茅草水分含量检测模型构建

结合以上研究, 选择 $D\lambda_r$, S_r , R_{ch} , PRI , $NDVI$, RVI , $NDSI$, RSI 和 Fd 等光谱特征参数, 以土壤水分条件为参照因子分别对 C1 和 C2 两组 CO_2 浓度条件下实验样本光谱特

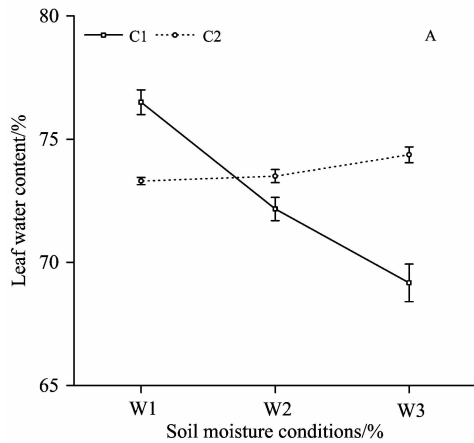


图 2 不同处理条件下羊茅草叶片含水量变化

Fig. 2 Changes in leaf water content of Fescue under different CO₂ concentrations and soil moisture conditions

征参数进行方差分析。由表 4 知, Rch, NDVI 和 Fd 在两种大气 CO₂ 浓度条件下, 组间差异达到极显著水平 ($p < 0.05$), 表明是利用高光谱遥感对羊茅草受旱程度进行监测的最优参数。叶片含水量指标(Y)与光谱特征参数指标(X)之间的关系, 利用 SPSS18 软件进行多元线性回归分析, 拟合得到羊茅草水分含量检测模型公式为

$$Y = -0.125X_{Rch} + 1.714X_{NDVI} - 0.023X_{Fd} + 0.018$$

$$R^2 = 0.89 \quad (1)$$

对模型公式进行显著性检验, 由表 5 可知, 模型 F 统计量为 15.588 > 7.21, 显著性检验水平 p 值为 0.000 < 0.01, 说明模型公式中羊茅草叶片含水量与 X_{Rch} , X_{NDVI} , X_{Fd} 等自变量线性关系十分显著, 建立的回归模型具备统计学意义。模型决定系数达到 0.89, 说明三个光谱特征变量能够用于检测羊茅草水分含量情况。植物反射光谱具有明显的分形特征, 其与叶片含水量都具有显著的负相关关系, 同时结合以上参数在羊茅草瘦旱情况下具有较好的区分度, 故综合认为采用以上三种参数可以实现对羊茅草水分无损监测。

表 4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

| 分组 | 方差分析 | $D\lambda r$ | S_r | Rch | PRI | NDVI | RVI | NDSI | RSI | Fd |
|----|------|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| C1 | F | 0.92 | 0.95 | 6.42 | 7.99 | 5.92 | 3.23 | 0.09 | 1.56 | 4.94 |
| | P | 0.29 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.67 | 0.21 | 0.02 |
| C2 | F | 0.50 | 0.65 | 2.97 | 2.13 | 4.13 | 0.42 | 0.22 | 0.13 | 3.21 |
| | P | 0.54 | 0.46 | 0.03 | 0.31 | 0.01 | 0.96 | 0.59 | 0.72 | 0.04 |

表 5 F 检验

Table 5 F-Test

| Model | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|------------|----------------|----|-------------|--------|-------|
| Regression | 0.046 | 3 | 0.015 | 15.588 | 0.000 |
| 1 Residual | 0.017 | 17 | 0.001 | | |
| Total | 0.063 | 20 | | | |

植物生长水分状况, 对于科学评估区域生境情况具有重要意义。基于高光谱数据, 对大气 CO₂ 浓度及干旱胁迫引起的羊茅草水分含量及光谱特征变化进行了分析, 结果表明归一化植被指数(NDVI)、叶绿素指数(Rch)、分形维数(Fd)对于不同土壤水分胁迫下的羊茅草长势分辨效果较好, 是监测羊茅草水分含量的有效参数; 据此构建了羊茅草水分含量检测模型, 初步实现了羊茅草受旱程度的高光谱检测方法, 对于丰富植被光谱探测技术研究具有重要理论与实践意义。考虑到植物对环境的适应性反应是逐步形成的, 故需对植物生长情况进行长期监测, 更有利于获取可靠准确的研究结果, 这是下一步研究的重点。

3 结 论

水分是限制植物生长好坏的主要因子之一, 了解和掌握

References

[1] LIU Ke, ZHOU Qing-bo, WU Wen-bin, et al(刘 轲, 周清波, 吴文斌, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(3): 155.

[2] JIANG Zi-zhu, ZHU Heng-guang, ZHANG Qian(姜籽竹, 朱恒光, 张 倩). Crops(作物杂志), 2015, (3): 23.

[3] ZHANG Shu-yong, XIA Jiang-bao, ZHANG Guang-can, et al(张淑勇, 夏江宝, 张光灿, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2014, 34(8): 1937.

[4] WANG Shu-wen, ZHAO Shan, ZHANG Chang-li, et al(王树文, 赵 珊, 张长利, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(13): 149.

[5] LI Lan-tao, WANG Shan-qin, REN Tao, et al(李岚涛, 汪善勤, 任 涛, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(14): 209.

[6] YUE Xue-jun, QUAN Dong-ping, HONG Tian-sheng, et al(岳学军, 全东平, 洪添胜, 等). Transactions of the Chinese Society of Agri-

- cultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(8): 207.
- [7] LIU Xiao-jun, TIAN Yong-chao, YAO Xia, et al(刘小军, 田永超, 姚 霞, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2012, 45(3): 435.
- [8] LIANG Liang, ZHANG Lian-peng, LIN Hui, et al(梁 亮, 张连蓬, 林 卉, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2013, 46(1): 19.
- [9] WU Long-guo, HE Jian-guo, LIU Gui-shan, et al(吴龙国, 何建国, 刘贵珊, 等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2014, 25(1): 135.
- [10] LONG Guang-qiang, CHEN Gong, GUO Bin, et al(龙光强, 陈 功, 郭 滨, 等). Journal of Yunnan Agricultural University(云南农业大学学报), 2008, 23(4): 468.

Study of the Establishment of Herb Water Content Detection Model Based on Hyperspectral Technology

ZHAO Yang¹, CHENG Chen¹, YANG Lu-lu², YU Xin-xiao²

1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China
2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract The detection of plant water deficit based on hyperspectral technology is the current research hotspot. Fescue is one of the major herbaceous plants which have the maximum usage in northern China, and its growth has a large demand for water, and it will have a series of changes in physical characteristics (color, texture, shape, etc.) and physiological characteristics under the condition of water deficit. By studying the establishment of plant water content detection model based on hyperspectral technology, the rapid non-destructive monitoring and assessment for the plant water deficit can be achieved, and the plant water status can be diagnosed comprehensively and reliably. The research can provide important basis for predicting the physiological response and change of common herbaceous plants in the North under future climate change. Fescue was sampled to carry out pot control simulation research under constant temperature and humidity conditions. The experiment involves two variables of CO₂ concentration (CX) and soil water holding capacity (WX). Two CO₂ gradients were set, 400 and 700 μmol · mol⁻¹, respectively. Three water holding capacity treatments were carried out at each CO₂ gradient, 100%, 40% and 20% of water holding capacity respectively. And then an ASD Field spec Hand Held spectrometer was used to measure the spectral reflection parameters of the fescue at 10:00—14:00 per day, including Spectral Reflectance (*R_i*), First Derivative Spectrum (*Dλ_i*), Red Edge Magnitude (*Dλ_r*), Red Edge Position (*λ_r*), Red Valley Absorption Depth (*D*), Red Edge Area (*S_r*), Photochemical Reflectance Index (PRI), Chlorophyll Index (Rch), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Spectral Index (NDSI), Ratio Spectrum Index (RSI), Fractal Dimension (Fd), etc. Regression analysis and statistical model building were applied to analyze the quantitative relationships between spectral parameters and physiological parameters. The complex relationships between spectral characteristic parameters and Fescue leaf water content were analyzed using statistical methods to extract optimal spectral characteristic parameters and subsequently to establish the estimation models of spectral characteristics and water deficit. The results showed that Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Chlorophyll Index (Rch), and Fractal Dimension (Fd) were significantly correlated with leaf water content at the 99% confidence level. So, we reckoned that the three spectral characteristic indicators are the most effective parameters for monitoring water deficit of Fescue. There are good linearities between leaf water content and spectral characteristic parameters, and the formula of detection model is, $Y = -0.125X_{Rch} + 1.714X_{NDVI} - 0.023X_{Fd} + 0.018$, and the model test is significant at the 99% confidence level. The results can provide the technical supports for rapid non-destructive monitoring of the drought degree of Fescue, and provide a scientific guidance for large scale irrigation and management of Fescue.

Keywords Hyperspectral; Water deficit; Statistical model; Evaluation

(Received Feb. 7, 2018; accepted Aug. 12, 2018)