

基于高光谱遥感监测小麦籽粒蛋白质含量的研究进展

刘大众, 刘升平*, 周国民, 李世娟, 杜鸣竹, 吕纯阳, 杨菲菲, 肖顺夫

(中国农业科学院农业信息研究所智能农业研究室/农业农村部信息服务技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 小麦籽粒蛋白质含量是小麦品质分级的一项重要指标, 其含量的高低直接影响小麦的品质。高光谱遥感技术是一种快速、无损监测手段, 在小麦生长过程中, 利用该技术对小麦蛋白质含量进行监测, 能够快速、准确地获取当前小麦籽粒蛋白质含量信息, 既为精准农业的实施提供了技术支撑, 也对后期小麦品质鉴定、分级加工起到很好的指导作用。本文综述了高光谱技术监测小麦籽粒蛋白质含量的国内外研究进展, 分析了基于不同原理、不同技术的小麦籽粒蛋白质含量监测方法的优缺点, 并提出了一些研究设想, 以为小麦籽粒蛋白质含量监测研究提供参考。

关键词: 小麦; 高光谱; 遥感技术; 蛋白质含量; 监测

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)04-0108-05

Research Progress in Wheat Grain Protein Monitoring Based on Hyperspectral Remote Sensing

LIU Dazhong, LIU Shengping*, ZHOU Guomin, LI Shijuan, DU Mingzhu, LYU Chunyang, YANG Feifei, XIAO Shunfu

(Agricultural Information Institute of CAAS, Intelligent Agricultural Research Laboratory / Key Laboratory of Agri-information Service Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: The protein content of wheat grain is an important index of wheat quality grading, and its content directly affects the quality of wheat. Hyperspectral remote sensing is a rapid and non-destructive monitoring method. In the process of wheat growth, the use of this technology to monitor the protein content of wheat can quickly and accurately obtain the current wheat grain protein content information. It not only provides technical support for the implementation of precision agriculture, but also plays a good guiding role in the later stage wheat quality identification and grading processing. In this paper, the research progress of using hyperspectral technology to monitor wheat protein content was reviewed, the advantages and disadvantages of wheat monitoring methods based on different principles and different techniques were analyzed, and some research ideas were put forward to providing reference for the study of wheat grain protein content monitoring.

Key words: Wheat; Hyperspectral; Remote sensing technology; Protein content; Monitoring

小麦是中国的主要粮食作物, 中国小麦年产量约 1.3 亿吨, 占全世界小麦总产量 17%, 居世界第一。同时, 小麦中富含蛋白质, 是人类所需蛋白质的重要来源, 因而小麦品质的优劣, 直接影响着农业经济的发展^[1]。近年来, 随着各种高产小麦品种的出现, 中国小麦单产显著提高, 总产

量也随之显著增长。目前, 中国小麦的总产量已经可以满足人民的需要, 但是高品质小麦的产量仍然无法满足需求, 发展高品质小麦将是未来小麦研究的重中之重^[2-3]。研究表明, 小麦籽粒蛋白质含量不仅取决于小麦的品种特性, 还受到地区的气候因素、环境因素以及生产过程中的栽培管理措施影响。由于小麦的品种特性不变, 且大田小麦的气候、环境因素不可控, 故而改变生产过程中的栽培管理措施成为了改变小麦籽粒蛋白质含量的主要方法。高光谱遥感技术能够快速、无损地获取到大田小麦的光谱数据, 这些光谱数据包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息, 很好

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 中国农业科学院创新工程(CAAS-ASTIP-2018-AII)

作者简介: 刘大众(1994-), 男, 在读博士, 主要从事无人机遥感技术、遥感图像处理技术研究。

通讯作者: 刘升平, 男, 博士, 副研究员, E-mail: liushengping@caas.cn

地反映了小麦的实时生长情况,根据小麦的生长状况反演出当前小麦籽粒蛋白质含量信息,制定合理的栽培管理措施,已经成为小麦籽粒蛋白质含量监测的一种重要方式。本文分析了国内外高光谱遥感技术在小麦籽粒蛋白质含量监测中的应用现状,并阐述了高光谱遥感技术当前遇到的问题以及今后高光谱技术可能的发展方向 and 趋势。

1 高光谱遥感技术概述

高光谱遥感,即高光谱分辨率遥感,指利用很多很窄的电磁波波段(通常 $<10\text{ nm}$)从感兴趣的物体获得有关数据^[4]。高光谱遥感能在可见光到短波红外范围内连续光谱成像,不仅光谱探测范围超过了肉眼的感知,还能连续记录数百个光谱波段,且各光谱通道间具有连续性。高光谱遥感技术具有光谱分辨率高、波段范围窄、图谱合一等独特优点,是当前遥感技术的前沿领域,已经广泛应用于各个领域,同样也引起了广大农业科研人员的关注。目前,高光谱在农业中主要用于快速、精确地获取地物特征^[5]、作物长势^[6]以及环境胁迫^[7]等信息,为精准农业提供技术支持。

2 高光谱遥感技术监测小麦籽粒蛋白质含量

高光谱遥感技术是用很窄而连续的光谱通道对地物持续遥感成像的技术,能够精细表达植株生化组分吸收及细胞结构多次散射的信息,因而成为精确获取作物信息的新兴技术平台^[8-9]。研究发现,小麦冠层在不同的波长位置会形成不同的光谱吸收和反射特征,小麦籽粒蛋白质的敏感波段集中在绿色植被有较强反射和强吸收的可见光波段($450\sim 700\text{ nm}$)以及有高反射和高透射的近红外波段($700\sim 1\,300\text{ nm}$);小麦叶片反射率与叶片全氮含量在 $820\sim 1\,400\text{ nm}$ 处相关性显著。采用高光谱遥感技术获取并分析小麦这些波段的光谱反射率,并基于这些敏感波段构建不同的植被指数,建立植被指数与小麦蛋白质含量的预测模型,可以较好地用于预测小麦蛋白质含量^[10]。

根据遥感平台的高度和特点,高光谱遥感技术可以分为地面高光谱遥感、高空高光谱遥感和近地高光谱遥感。

2.1 地面高光谱遥感

地面高光谱是最早出现的一种高光谱技术,可以分为地面非成像高光谱与地面成像高光谱。地面高光谱具有波段数多、波段窄、分辨率高等

特点,被广泛应用于农业监测研究。

地面高光谱仪器多为便携式,能够精确地测量到不同高度、不同位置的小麦植株高光谱数据,因而常被用于垂直植被光谱的测定。杨宝华等^[11]采用了ASD地物高光谱仪分别采集了小麦不同时期的原始光谱,并采用CARS法对小麦敏感波段进行了筛选,获取了30个敏感波段,对比反向传播神经网络、支持向量机(SVM)以及径向基神经网络建模的结果发现,基于误差反向传播(BP)神经网络建模的模型效果最好,建模决定系数 R^2 为0.829 5,预测集的预测决定系数 R^2 为0.824 7。He等^[12]研究了冬小麦叶片氮素含量(LNC)与地面多角度遥感高光谱反射率之间的定量关系,发现比率指数与LNC在 -20° 视角下表现出最佳线性关系, R^2 达到0.819。Tan等^[13]分别分析了小麦叶片氮素积累量(LNA)与原始高光谱反射率和一阶微分高光谱反射率之间的相关关系,发现原始高光谱反射率(790.4 nm)与LNA的积分线性回归关系较好, R^2 达到0.813;一阶微分高光谱(831.7 nm)与LNA进行指数回归,效果较好,精度 R^2 达到0.847。

地面高光谱遥感能够精确获取不同层次、角度和垂直高度的小麦高光谱数据,可以很好地分析小麦不同结构的光谱变化情况。但由于地面光谱仪测量面积小,操作复杂、费时、费力,不适合大面积的小麦光谱数据的测量等问题,限制了地面高光谱遥感的使用与发展。在使用地物光谱仪时多采用抽样测量法,无法获取试验区每个点的光谱数据,并且在测量过程中存在主观差异,会造成一定的误差,不是一种理想的小麦蛋白质含量监测方法。

2.2 高空高光谱遥感技术

高空高光谱遥感包括航天高光谱遥感和航空高光谱遥感。航天遥感(又称为卫星遥感)指轨道高度在10万m以上的人造卫星、航天飞机和天空实验室等遥感;航空遥感分为高空(1万~2万m)、中空(0.5万~1万m)和低空(0.1万~0.5万m)三种类型,是一种用飞机携带遥感仪器的高光谱遥感技术。高空高光谱遥感具有测量面积广泛以及数据获取简单等优点,有效地弥补了地面高光谱技术缺陷,并被广泛应用于小麦籽粒蛋白质含量的监测。

LI等^[14]利用高光谱遥感估测小麦垂直叶片氮分布,发现小麦垂直叶片氮分布与高光谱遥感数据有确定性的规律,能够用于间接预测小麦籽粒

蛋白质含量。Zhao等^[15]利用高光谱遥感卫星图像获取冬小麦开花期的植被指数和籽粒灌浆期的冠层光谱,并分析了植被指数和籽粒灌浆期的冠层光谱与籽粒蛋白质含量之间的相关关系。结果表明,植被指数和籽粒灌浆期的冠层光谱与籽粒蛋白质含量显著相关,可以用于籽粒蛋白质含量的监测。Hansen等^[16]通过高光谱遥感技术,分别使用Single-PLS1、Unfold-PLS1、N-PLS1方法发现冠层反射测量数据与冬小麦蛋白质含量相关性分别达到0.672、0.697和0.754。

高空高光谱遥感技术克服了地面高光谱采样费时、费力,采集范围小的缺点,可以方便、快捷地获取到大面积的小麦光谱数据,在大区域小麦定性监测研究中具有较大优势。但是高空高光谱遥感技术地表分辨率低,重访周期长,花费成本高,采用高空高光谱遥感技术监测小麦籽粒蛋白质含量时,获取到的图像数据分辨率低,单个像元覆盖内容复杂,且很难获取到小麦生长过程的多时相数据,在进行田块尺度的小麦籽粒蛋白质定量监测研究中不是理想的监测方法。

2.3 近地高光谱遥感技术

过去,近地高光谱遥感多指距地面高度在0.1万m以下的系留气球(500~1 000 m)和遥感铁塔(30~400 m)等高光谱遥感。随着无人机(UAV)技术的出现,以无人机为搭载平台的低空无人机遥感技术快速发展起来,并且成为了近地高光谱遥感的一个最重要方式。与传统的高空遥感相比,无人机遥感具有获取数据更加快速、便捷,使用成本低、操作简单的特点,其一出现便吸引了众多研究人员的关注。目前,无人机遥感技术尚且处于发展阶段,采用无人机高光谱技术监测小麦籽粒蛋白质含量的研究暂时较少。

Jensen等^[17]使用1.8 m直径氦气球的低空平台获得了彩色和近红外图像,分析图像的数字信息和作物参数的关系,发现光谱参数和籽粒蛋白质含量的相关性 R^2 达到0.66。Du等^[18]基于UAV图像分析植被指数NDVI与籽粒蛋白质含量的相关性,发现NDVI与小麦生长后期籽粒蛋白质含量的关系最为显著。Liu等^[19]获取了小麦拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期的无人机高光谱数据,并且分析了在不同时期、不同波段反射率与LNC之间的相关关系,并分别采用统计分析和BP神经网络方法进行建模,得到了精确度较高的籽粒蛋白质含量监测模型。

近地高光谱遥感技术解决了高空高光谱技术

地表分辨率低、重访周期长和花费成本高的缺陷,能够快速、精确地获取小麦不同生育期实时、高分辨率的高光谱图像数据,在田块尺度范围内的小麦籽粒蛋白质含量定量监测研究中效果更佳。但是该技术目前尚不成熟,基于无人机平台的近地高光谱系统还没有理想的匹配云台,采集过程受风速影响严重且图像会出现畸变,造成严重误差。随着科技的进一步发展,高精度的无人机图像采集云台将会出现并解决近地高光谱遥感监测平台目前面临的问题,近地高光谱遥感技术也将走向成熟。近地高光谱遥感技术用于监测小麦籽粒蛋白质含量将会成为田块尺度下小麦籽粒蛋白质含量定量监测的研究热点和重要趋势。

3 高光谱遥感模型构建方法

3.1 “光谱参数—籽粒蛋白质含量”的经验模型

这种方法是利用小麦冠层不同波长的光谱反射值,计算得到与小麦籽粒蛋白质含量相关性显著的光谱参数^[20-24],并分析光谱参数与籽粒蛋白质含量的相关关系,构建植被指数与籽粒蛋白质含量之间的预测模型。金秀良等^[25]选取了10种植被指数,采用灰色关联分析方法,分析单一指数、比率指数和乘积指数与籽粒蛋白质含量间存在的灰色关联关系,研究发现,与单一指数相比,比率指数和乘积指数与籽粒蛋白质含量间的相关性更高,作为构建变量预测籽粒蛋白质含量精度更高。

基于此种方法构建模型方便快捷,但是模型的机理性较弱,过分依赖于建模样本,无法反映出植物的生长过程变化,虽然也可以获得较高的模型精度,但是模型受到地理位置和环境影响较大,无法进行区域化推广和大规模应用。

3.2 “光谱参数—农学参数—籽粒蛋白质含量”的经验模型

冬小麦不同生育期叶片叶绿素含量、叶片氮素含量和叶片氮积累量等农学参数与小麦籽粒蛋白质含量相关性显著^[26],通过计算与农学参数相关性较好的光谱参数^[27-31],实现对农学参数的精确反演,再根据农学参数与籽粒蛋白质含量之间的相关性关系,依靠参数间关系传递性来间接预测GPC。黄文江等^[32]通过对红边参数与叶片全氮含量进行相关分析,发现红边参数的归一化最小振幅可以很好地反演叶片全氮含量,进一步建立了叶片全氮含量与籽粒蛋白质品质指标间的关系模型,证实了运用红边参数的归一化最小振幅反演

叶片全氮含量预测小麦籽粒蛋白质含量是可行的。贺佳等^[33]研究了不同氮磷水平、不同生育时期的冬小麦冠层光谱反射率、植株氮含量以及成熟期籽粒蛋白质含量之间的相关关系,发现在拔节期以后建立植株氮含量与成熟期籽粒蛋白质含量间的监测模型,监测精度较好。

相比于光谱参数—籽粒蛋白质含量的直接预测方法,这种间接预测小麦籽粒蛋白质含量的方法机理性更强,能够更好地反映植物生长过程中氮素的变化情况。与作物生长模型相比,模型结构较为简单,并且能够在一定程度上反映植株生理生化参数与籽粒蛋白质含量之间的变化情况,受到环境和气候因素影响较小,能够进行一定范围的推广,是一种较为理想的模型。

4 问题与展望

综上,国内外众多专家学者采用高光谱技术监测小麦蛋白质含量已经取得了较多的研究成果,但是,由于小麦籽粒蛋白质含量受到气候环境的影响较大,目前的模型还不能适应大面积推广应用,因而如何提高模型精度和区域适用性仍将是今后研究的关键。笔者认为小麦籽粒蛋白质含量监测将向以下几个方向发展。

4.1 从单一时期的模型向多时相模型发展

目前小麦的模型大多是单一时期的小麦模型,模型无法推广到其他生育时期,且无法监测小麦整个生长过程氮素的动态变化。与单一时期的小麦预测模型相比,小麦多时相预测模型可以在多个生长时期进行小麦氮素预测,分析小麦在不同时期的生长状态,并根据当前的生长状况,制定合适的管理方案,促进小麦后期的生长。因此,小麦多时相预测模型将会是未来研究的重点。

4.2 数据获取趋向于更加精确化和简单化

随着信息技术和光谱技术的发展,各种高光谱数据获取的精密仪器和软件也将快速发展,高光谱数据获取将会朝着简单、便捷、精确的方向发展。采用更加精确化、简单化的数据获取方式,获取高分辨率、实时、精准的高光谱遥感数据将是未来的研究趋势。

4.3 模型的单点模拟到区域预测的拓展

小麦的氮素积累不仅与其品种特性有关,也受到环境因素和气候因素的影响,目前的小麦模型大多局限于某一地区,模型的推广性较差。因而,在未来的研究中,应采用卫星遥感获取不同区域范围内的气候状况,将环境因素和气候因素

融入模型,提高模型的精确度和区域适用性。

参考文献:

- [1] 蒲艳艳,李娜娜,宫永超,等.中国小麦蛋白质品质性状分析及主要影响因子的研究进展[J].中国农学通报,2015,31(15):140-145.
- [2] 刘慧,王朝辉,李富翠,等.不同麦区小麦籽粒蛋白质与氨基酸含量及评价[J].作物学报,2016,42(5):768-777.
- [3] 魏益民,张波,关二旗,等.中国冬小麦品质改良研究进展[J].中国农业科学,2013,46(20):4189-4196.
- [4] 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000:3.
- [5] 王庆超,付光远,汪洪桥,等.多核融合多尺度特征的高光谱影像地物分类[J].光学精密工程,2018,26(4):980-988.
- [6] 王超,王建明,冯美臣,等.基于多变量统计分析的冬小麦长势高光谱估算研究[J].光谱学与光谱分析,2018,38(5):1520-1525.
- [7] 徐道青,刘小玲,王维,等.淹水胁迫下棉花叶片高光谱特征及叶绿素含量估算模型[J].应用生态学报,2017,28(10):3289-3296.
- [8] Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Monitoring leaf ni-trogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 135-142.
- [9] Tarpley L, Reddy K R, Sassenrath-Cole G F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration[J]. Crop Science, 2000, 40: 1814-1819.
- [10] 李少昆,谭海珍,王克如,等.小麦籽粒蛋白质含量遥感监测研究进展[J].农业工程学报,2009,25(2):302-307.
- [11] 杨宝华,陈建林,陈林海,等.基于敏感波段的小麦冠层氮含量估测模型[J].农业工程学报,2015,31(22):176-182.
- [12] He L, Zhang H Y, Zhang Y S, et al. Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing: the journal of the European Society for Agronomy[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 170-185.
- [13] Tan C, Du Y, Zhou J, et al. Analysis of different hyperspectral variables for diagnosing leaf nitrogen accumulation in wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 674.
- [14] Li H, Zhao C, Huang W, et al. Non-uniform vertical nitrogen distribution within plant canopy and its estimation by remote sensing: A review[J]. Field Crops Research, 2013, 142(3): 75-84.
- [15] Zhao C, Liu L, Wang J, et al. Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2004, 7(1): 1-9.
- [16] Hansen P M, Jorgensen J R, Thomsen A. Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression[J]. J. Agr. Sci., 2002, 139(3): 307-318.
- [17] Jensen T, Apanb A, Young F, et al. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 51(1-2): 66-77.
- [18] Du M, Noguchi N. multi-temporal monitoring of wheat growth

- through correlation analysis of satellite images, unmanned aerial vehicle images with ground variable[J]. IFAC Papers OnLine, 2016, 49(16): 5-9.
- [19] Liu H, Zhu H, Wang P. Quantitative modelling for leaf nitrogen content of winter wheat using UAV-based hyperspectral data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(8-10): 18.
- [20] 薛利红,朱 艳,张 宪,等.利用冠层反射光谱预测小麦籽粒品质指标的研究[J].作物学报,2004(10):1036-1041.
- [21] 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.
- [22] 周冬琴,朱 艳,姚 霞,等.基于水稻冠层光谱特征构建粳型水稻籽粒蛋白质含量预测模型[J].作物学报,2007(8):1219-1225.
- [23] 李映雪,朱 艳,田永超,等.小麦冠层反射光谱与籽粒蛋白质含量及相关品质指标的定量关系[J].中国农业科学,2005,38(7):1332-1338.
- [24] Pettersson C G, Eckersten H. Prediction of grain protein in spring malting barley grown in northern Europe[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(2-4): 205-214.
- [25] 金秀良,徐新刚,李振海,等.基于新型植被指数对冬小麦蛋白质含量的估算研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(9):2541-2545.
- [26] 宋晓宇,王纪华,杨贵军,等.基于叶片及冠层叶绿素参数
- 的冬小麦籽粒蛋白质含量预测研究[J].光谱学与光谱分析,2014,34(7):1917-1921.
- [27] Yao X, Zhu Y, Tian Y C, et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geo-information, 2009, 12(2): 89-100.
- [28] Wright D, Rasmussen V, Ramsey R, et al. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management[J]. GIScience & Remote Sensing, 2004, 41(4): 287-300.
- [29] 尼加提·卡斯木,师庆东,王敬哲,等.基于高光谱特征和偏最小二乘法的春小麦叶绿素含量估算[J].农业工程学报,2017,33(22):208-216.
- [30] 肖春华,李少昆,王克如,等.基于多视角反射光谱的冬小麦冠层叶片氮素营养监测研究[J].作物学报,2007(7):1141-1145.
- [31] 冯 伟,朱 艳,田永超,等.利用高光谱遥感预测小麦籽粒蛋白质产量[J].生态学杂志,2008(6):903-910.
- [32] 黄文江,赵春江,王纪华,等.红边参数在作物营养诊断和品质预报上的应用[J].农业工程学报,2004,20(6):1-5.
- [33] 贺 佳,刘冰峰,黎世民,等.不同生育时期冬小麦籽粒蛋白质含量的高光谱遥感监测模型[J].中国生态农业学报,2017,25(6):865-875.

(责任编辑:刘洪霞)

(上接第57页)

- [4] 景立权,赖上坤,王云霞,等.大气CO₂浓度和温度互作对水稻生长发育的影响[J].生态学报,2016,36(14):4254-4265.
- [5] 景立权,赵新勇,周 宁,等.高CO₂浓度对杂交水稻光合作用日变化的影响—FACE研究[J].生态学报,2017,37(6):2033-2044.
- [6] Jing L Q, Zhao X Y, Zhou N, et al. Effect of increasing atmospheric CO₂ concentration on photosynthetic diurnal variation characteristics of hybrid rice: a FACE study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 2033-2044.
- [7] 朱正威,赵占良.生物—分子与细胞[M].北京:人民教育出版社,2004:103-105.
- [8] 郭培国,李荣华.提高环境CO₂浓度和环境温度对植物光合作用的影响[J].广州师院学报(自然科学版),1999,20(5):51-55.
- [9] 张铂钰.高二氧化碳浓度对植物光合作用的影响[J].科技展望,2017(5):28.
- [10] 田露文.基质育苗中CO₂加富对黄瓜光合作用及生长发育的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [11] 刘 洋,孙 胜,邢国明,等.不同浓度CO₂施肥对温室黄瓜生长与产量的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(2):53-58.
- [12] 张振花,孙 胜,邢国明,等.增施CO₂对温室番茄结果期叶片光合特性的影响[J].生态学报,2018,37(5):1398-1402.
- [13] 袁宏霞,孙 胜,张振花,等.日光温室CO₂加富对番茄叶片光合特性的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):136-139.
- [14] 刘中华,李招弟,刘 珂,等.管送式温室药物气雾化装置气雾化效果的试验研究[J].东北农业科学,2019,44(3):40-44.
- [15] 刘婷婷,王立群,王 辉,等.大气CO₂浓度对水稻食味品质的影响[J].东北农业科学,2017,42(2):49-52.
- [16] 王同翠.保护地蔬菜二氧化碳施肥适用技术[J].新农业,2018(5):23-24.
- [17] 段丽丽,朱有为.大棚蔬菜增施CO₂气肥的研究与应用[J].上海农业科技,1999(1):52-53.
- [18] 张桂香.温室黄瓜生产中如何增加室内二氧化碳浓度[J].现代农村科技,2011(20):18.
- [19] 王 琪.初中化学“复分解反应”的教学研究[D].成都:四川师范大学,2015.
- [20] 柴守霞,雷美容,王春雷,等.一种新型注射器的制作与应用[J].护理研究,2016,30(18):2304.
- [21] 袁甘林.工艺参数对医用注射器注射成型结晶度与壁厚均匀性的影响[D].南昌:南昌大学,2016.
- [22] 陈泽君,程敏熙.基于tracker和python的物理建模方法—以研究抛体运动的阻力变化为例[J].大学物理实验,2015,28(3):84-87.
- [23] 赵志栋,陈光红.从抛物线的几何性质看抛体运动的射程问题[J].物理教师,2016,37(7):56-57.

(责任编辑:王 昱)