



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

烤烟叶片镉含量高光谱预测模型的构建

陈楠, 冯慧琳, 杨艳东, 陈萍, 任天宝, 贾方方, 刘国顺

引用本文:

陈楠, 冯慧琳, 杨艳东, 等. 烤烟叶片镉含量高光谱预测模型的构建[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 570–575.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0471>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高光谱数据的滴灌甜菜叶绿素含量估算

李宗飞, 苏继霞, 费聪, 李阳阳, 刘宁宁, 樊华, 陈兵

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 761–769 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0388>

基于高光谱的小麦旗叶净光合速率的遥感反演模型的比较研究

吕玮, 李玉环, 毛伟兵, 宫雪, 陈士更

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 582–586 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0173>

基于高光谱数据的北疆绿洲农田灰漠土有机质反演

单海斌, 蒋平安, 颜安, 朱磊, 郭星

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 276–282 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0256>

钾肥对镉污染土壤大白菜品质的效应研究

王小晶, 陈怡, 王菲, 王正银

农业资源与环境学报. 2015(1): 42–49 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0192>

生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异

朱盼, 应介官, 彭抒昂, 姜存仓

农业资源与环境学报. 2015(6): 590–595 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0152>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈楠, 冯慧琳, 杨艳东, 等. 烤烟叶片镉含量高光谱预测模型的构建[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 570–575.

CHEN Nan, FENG Hui-lin, YANG Yan-dong, et al. Establishment of hyperspectral prediction model for cadmium content in flue-cured tobacco leaves[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 570–575.



开放科学 OSID

烤烟叶片镉含量高光谱预测模型的构建

陈楠^{1,2}, 冯慧琳^{1,2}, 杨艳东^{1,2,3}, 陈萍¹, 任天宝^{1,2*}, 贾方方^{4*}, 刘国顺^{1,2}

(1. 河南农业大学烟草学院/河南省生物炭工程技术研究中心, 郑州 450002; 2. 生物炭技术河南省工程实验室, 郑州 450002; 3. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 4. 商丘师范学院生物与食品学院, 河南 商丘 476000)

摘要:为快速准确地获取烟草叶片镉含量,本研究模拟了4个镉污染水平,用美国ASD光谱仪获取每个污染水平的烟草叶片光谱反射率,并测定不同时期烟草叶片的镉含量,筛选出与镉含量相关性最好的敏感波段,并建立光谱参数,将光谱参数作为输入因子建立烟草叶片镉含量的BP神经网络模型。结果表明:随着镉含量增加,在可见光和近红外范围(400~910 nm)内反射率先降低后增加,在930~1 000 nm波段范围内,叶片反射率与烟叶中镉含量呈正相关,在1 000~2 500 nm波段范围内反射率先增加后降低。经筛选,比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)的光谱指数分别为RVI(520, 710)和NDVI(530, 710);BP神经网络模型的决定系数(R^2)为0.681,均方根误差(RMSE)为8.001,并对模型进行检验, R^2 为0.801, RMSE为4.430。研究表明,BP神经网络模型对烟草叶片镉含量具有良好的预测效果。

关键词:烟草;镉;高光谱;模型;BP神经网络

中图分类号:X87;S572 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)04-0570-06 doi: 10.13254/j.jare.2020.0471

Establishment of hyperspectral prediction model for cadmium content in flue-cured tobacco leaves

CHEN Nan^{1,2}, FENG Hui-lin^{1,2}, YANG Yan-dong^{1,2,3}, CHEN Ping¹, REN Tian-bao^{1,2*}, JIA Fang-fang^{4*}, LIU Guo-shun^{1,2}

(1. Tobacco College of Henan Agricultural University/Henan Biochar Engineering Research Center, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Biochar Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002, China; 3. Agricultural College of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. College of Biology and Food, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

Abstract: Heavy metal pollution has become the focus of environmental biology and crop quality and safety. In order to obtain the cadmium content of tobacco leaves quickly and accurately, four cadmium pollution levels were simulated. The spectral reflectance of tobacco leaves in each treatment was obtained using an American ASD spectrometer, and the cadmium content of tobacco leaves in different periods was measured. The sensitive bands with the best correlation with the cadmium content were selected, and the spectral parameters were used as input factors to establish a back propagation (BP) neural network model of the cadmium content in tobacco leaves. The results showed that as the cadmium content increased, the reflectance in the visible light and near-infrared range (400~910 nm) first decreased and then increased. In the wavelength range of 930~1 000 nm, the leaf reflectivity was positively correlated with the cadmium content in the tobacco leaf. The reflectance in the 1 000~2 500 nm broadband range first increased and then decreased. The selected spectral indexes ratio vegetation index (RVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) were RVI(520, 710) and NDVI(530, 710), respectively. The

收稿日期:2020-08-28 录用日期:2020-11-16

作者简介:陈楠(1995—),女,云南昆明人,硕士研究生,从事烤烟栽培生理生化研究。E-mail:2042035347@qq.com

*通信作者:任天宝 E-mail:tianbao1016@126.com;贾方方 E-mail:jiafang840928@163.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD0200808);河南青年骨干教师资助项目(2020GGJS047);南平烟草公司重点科技攻关项目(南烟司叶[2017]21号);广东中烟科技攻关项目(2020440000340029)

Project supported: The National Key Research and Development Project (2017YFD0200808); Henan Young Backbone Teachers Funding Project (2020GGJS047); Key Scientific and Technological Projects of Nanping Tobacco Company ([2017]21); Science and Technology Project of Guangdong China Tobacco Industry Co., Ltd. (2020440000340029)

R^2 of the BP neural network model was 0.681 and the root mean square error(RMSE) was 8.001, the model was tested, and the test results showed that the R^2 was 0.801 and the RMSE was 4.430. The results showed that the BP neural network model could provide a good prediction of the cadmium content in tobacco leaves.

Keywords: tobacco; cadmium; hyperspectral; model; BP neural network

金属镉具有很强的生物毒性,被植物吸收后,不仅影响植物的生长发育,还会通过植物以及食物链危害人体健康^[1-5]。植株吸收的镉含量达到一定量后会出现发育迟缓、植株矮小、叶片失绿等症状,进而导致品质降低以及作物减产。烟草是我国重要经济作物,镉胁迫会降低烟叶化学成分之间的协调性,如糖碱比、氮碱比等^[6],还会导致可溶性糖^[7]、钾^[8]含量降低,蛋白质^[9]含量增加,品质下降。吴坤等^[10]的研究发现,当烟草植株内镉元素达到一定量后,会使光合色素含量减少,导致光合速率降低,进而影响烤烟的安全和品质。曹玉巧等^[11]的研究发现,镉在烟草叶片中积累过量时,会通过烟气进入人体,影响人体健康。

近些年来,随着遥感技术的发展,快速、无损、实时获取植被信息已经成为可能。运用遥感技术分析烟草冠层光谱反射率与理化参数的相关性,可建立各种理化参数的光谱监测模型。这些模型能够监测植物叶片的镉含量,例如李岚涛等^[12]的研究发现,镉胁迫显著影响菊苣叶片的高光谱反射特性。刘来等^[13]以油菜为研究对象,建立了油菜叶片镉含量与光谱特征参数之间的多元回归模型。关丽等^[14]着重分析受镉污染的水稻叶片中叶绿素含量变化及其光谱反射特性,并建立了水稻冠层的叶绿素遥感监测参数对镉污染程度的响应模型,但估算精度还有待进一步提高。孙小香等^[15]以水稻为研究对象,建立了水稻氮素的传统线性模型、多元线性模型和BP神经网络模型,研究表明BP神经网络模型的预测效果最好。Chen等^[16]以光谱参数为输入参数,构建BP神经网络模型反演水稻色素含量,发现其精度高于多元逐步回归模型。与传统的线性模型相比,具有强大的非线性映射能力的BP神经网络结合高光谱数据分析,可以提高植被的生理生化参数预测准确性^[17],对水稻^[18]、小麦^[19]、玉米^[20]、大豆^[21]等作物均具有良好的应用效果。

为快速准确地获取烟草叶片镉含量,本研究通过获取镉污染条件下烟草叶片中的镉含量和高光谱反射率,结合植被指数对两者进行分析,并基于植被指数构建烟草叶片镉含量监测模型,旨在为烟草安全生产和烟叶品质管控提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2019年6月至9月在河南农业大学国家烟草栽培生理生化重点实验室内进行。供试品种为中烟100。供试土壤取自河南农业大学许昌校区现代烟草科教园区0~20 cm耕层,土壤类型为褐土,基础肥力:pH 7.25,碱解氮 116.45 mg·kg⁻¹,有效磷 19.32 mg·kg⁻¹,速效钾 158.15 mg·kg⁻¹,有机质 15.74 g·kg⁻¹。采用超纯水和硫酸镉(3CdSO₄·8H₂O)配制硫酸镉水溶液,一次性均匀加入土壤中,分别调节4个土壤镉含量为0、5、10、20 mg·kg⁻¹,待水分蒸发后多次混筛均匀。试验采用盆栽的方式,将供试土壤自然风干后过10目筛,每盆装土1.2 kg,土壤所施肥料为烟草复合肥(N:P₂O₅:K₂O=10:10:20)0.01 kg、硫酸钾0.01 kg、过磷酸钙0.005 kg,将肥料与土壤充分混匀10 d后,选择苗龄、长势一致,生长状况良好的烟苗进行移栽,每盆一株,每日定时浇水。

从移栽后30 d开始每隔15 d对烟株镉含量和光谱数据进行测定,共测定3个时期,每个时期每个处理6个重复,共72株。

1.2 叶片光谱数据的获取

分别在烟株移栽后30、45、60 d进行叶片光谱测定。每处理选6株生长正常、长势一致的烟株。采用FieldSpec3便携式地物光谱仪(美国ASD公司)测定高光谱数据,波长350~2 500 nm,其中350~1 000 nm范围内采样间隔1.4 nm,光谱分辨率3 nm;1 000~2 500 nm范围内采样间隔2 nm,分辨率10 nm。采用叶片夹持器在每个烟株选取上、下2片叶测定光谱,每片叶测5个点,测定时尽量避开主脉和支脉,如图1所示。每点测定10条光曲线,每片叶共获取光谱曲线50条,取平均值作为该株烟的叶片光谱,所有处理光谱数据共计72组,其中有效数据71组。每次测定前均用标准参考白板进行校正。

1.3 烟叶中镉含量的测定

每次测完所有烟草叶片的光谱数据之后2~3 h内取样杀青,尽可能减小光谱测量与取样的时间差。



图1 烟草叶片光谱测定位置示意图

Figure 1 Position of tobacco leaf spectrum determination

采集的烟株叶片于烘箱中 105 ℃ 杀青, 65 ℃ 烘干, 烘干后将烟叶研磨过 40 目筛。之后加入 HNO_3 和 H_2O_2 置于自动消解仪中进行消解, 消解后的溶液中镉含量采用电感耦合等离子原子发射光谱仪(ICP-OES)测定。

1.4 植被指数

植被指数是由光谱数据经线性和非线性组合构成的对植被有一定指示意义的光谱参数。比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)是绿色植物的灵敏指示参数, 可用于监测和估算植物生物量; 归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是反映农作物长势和营养信息的重要参数, 对获取作物信息具有重要的指导作用^[22-23]。

$$\text{RVI} = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \quad (1)$$

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}} \quad (2)$$

式中: R_{λ_1} 指在波长 λ_1 处叶片的光谱反射率; R_{λ_2} 指在波长 λ_2 处叶片的光谱反射率。

1.5 BP神经网络

BP (Back propagation) 神经网络是 1986 年由 Rumelhart 和 McClelland 等科学家提出的概念, 是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络, 是应用最广泛的神经网络。本研究将筛选的植被指数作为 BP 神经网络的输入因子, 输入层传递函数为 S 型正切传递函数(Tansig), 训练函数采用 L-M 优化算法函数(Trainlm), 烟草叶片镉含量作为输出层, 输出层传递函数采用线性传递函数(Purelin)。

1.6 数据分析

用 ViewSpecPro 导出原始光谱数据后, 用 Excel 进行前处理, Origin 进行绘图, 采用 Matlab 绘制等势图和进行 BP 神经网络模型训练与检验。

2 结果与讨论

2.1 不同镉含量烟草叶片光谱反射率

根据所有样本镉含量水平, 将样本分为数量相近

的 3 类, 分别为低镉 ($<15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中镉 ($15 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、高镉 ($>30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。如图 2 所示, 在可见光和近红外范围 (400~910 nm) 内, 随着镉含量增加, 反射率先降低后增加, 这种变化在绿光波段尤为明显, 在 930~1 000 nm 波段范围内, 叶片反射率与烟叶中镉含量呈正相关。这可能是由于低浓度的镉会促进植物的生长发育, 使叶绿素含量增加, 导致反射率降低^[24], 当超过一定的浓度后就会产生极其显著的抑制作用, 破坏叶片内部结构, 使叶绿素含量减少, 进而导致叶片黄化失绿、反射率增加^[25]。除此之外, 在 1000~2 500 nm 波段范围内, 随着镉含量增加, 反射率先增加后降低。

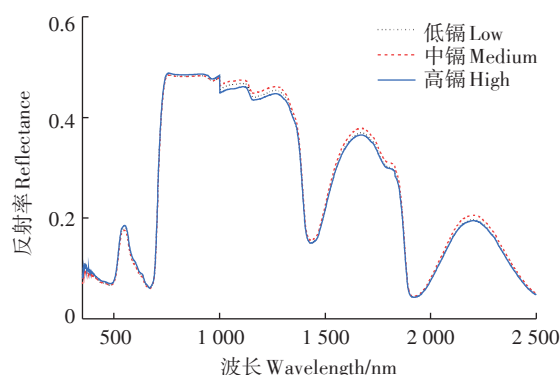


图2 不同镉含量烤烟叶片冠层光谱反射率

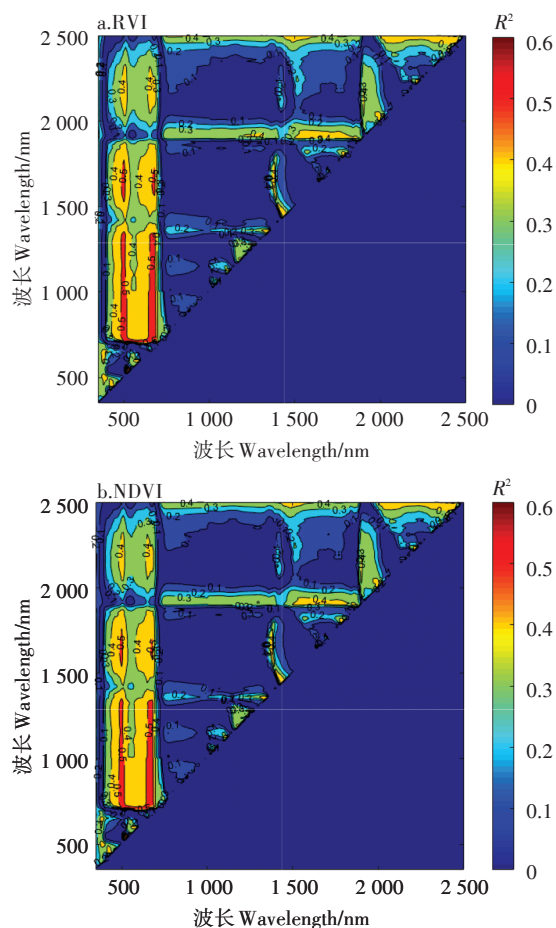
Figure 2 Spectral reflectance of flue-cured tobacco canopy with different cadmium contents in leaves

前人对小白菜、油菜等作物的研究表明, 叶片光谱特征与叶片镉含量具有较好的相关性^[26-27]。本研究表明, 不同镉含量的烟草叶片光谱反射率也具有一定规律性, 这使得应用遥感技术监测烟草镉含量成为可能。

2.2 敏感波段的筛选

基于烟草叶片中镉含量与光谱反射率的关系, 采用减量精细采样法, 系统分析了不同条件下 350~2 500 nm 光谱范围内任意两波段的光谱反射率组合构建的植被指数(RVI、NDVI)与烟草叶片镉含量的定量关系, 并绘制了决定系数(R^2)的等势图(图3)。

如图 3a 所示, RVI 的 $R^2 > 0.6$ 的波段组合范围为 (510~555 nm, 708~715 nm), 筛选的核心波段为 520 nm 和 710 nm, 光谱指数为 RVI(520, 710); 图 3b 中, NDVI 的 $R^2 > 0.6$ 的波段组合范围为 (510~555 nm, 708~714 nm), 筛选的核心波段为 530 nm 和 710 nm, 光谱指数为 NDVI(530, 710)。根据敏感波段, 选择决定系数较大的 RVI 和 NDVI, 建立预测烟草叶片镉含量的

图3 RVI和NDVI的决定系数(R^2)等势图Figure 3 Isopotential diagram of determination coefficient(R^2) of RVI and NDVI

BP神经网络模型。本研究筛选的波段主要集中在可见光和红边波段,这与刘来等^[13]的研究结果一致。

2.3 镉含量监测模型

随机选取50个样本用来建立模型,剩余21个样本用来验证模型。选取已经筛选出的决定系数最大的前20个RVI(520,710)和前20个NDVI(530,710)作为独立的自变量,建立预测烟草叶片镉含量的BP神经网络模型。

BP神经网络模型采用试错法比对不同节点数的对应值,获得最佳隐藏节点数为13,设定目标精度为0.01,迭代次数为5 000次,当拟合精度达到目标精度时,神经网络自动停止训练。BP神经网络的预测结果如图4所示,该预测模型的 R^2 为0.681, RMSE为8.001,表明BP神经网络对烟草叶片镉含量的预测效果良好。

2.4 模型检验

选取剩余21个样本对所建模型进行验证。图5

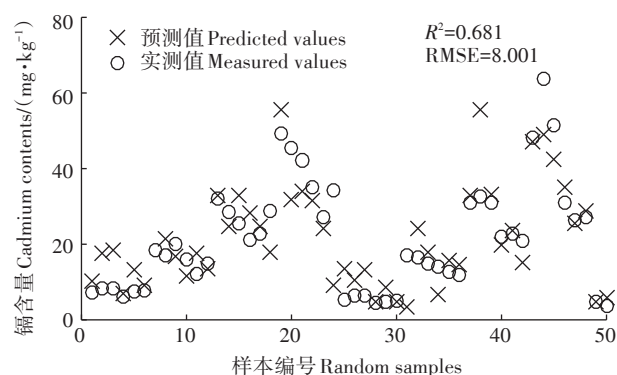


图4 BP神经网络模型的训练结果

Figure 4 Training results of BP neural network model

所示为BP神经网络模型的预测值与实测值之间1:1关系图。图中的点越是集中分布在对角线周围,表明模型的预测精度越高、效果越好。BP神经网络模型的预测值与实测值的 R^2 为0.801, RMSE为4.430,检验结果表明BP神经网络模型对烟草叶片镉含量具有良好的预测效果。

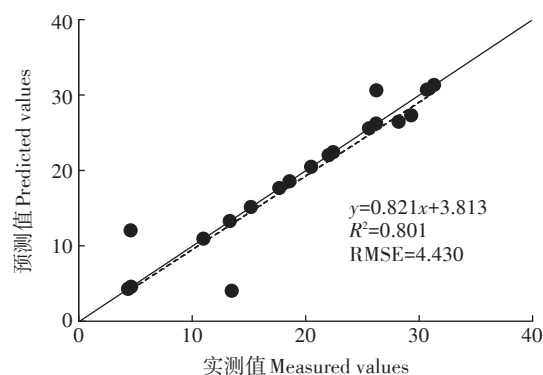


图5 BP神经网络模型检验结果

Figure 5 Test results of BP neural network model

3 结论

(1) 本研究表明,烟草叶片镉含量与烟草叶片光谱反射率之间具有一定的相关性,镉含量对烟草叶片的反射率产生一定影响。随着镉含量增加,在可见光和近红外范围(400~910 nm)内反射率先降低后增加;在930~1 000 nm波段范围内,叶片反射率与烟叶中镉含量呈正相关;在1 000~2 500 nm波段范围内随着镉含量增加,反射率先增加后降低。

(2) 采用减量精细采样法绘制了RVI和NDVI的 R^2 等势图。RVI的 $R^2>0.6$ 的波段组合范围为(510~555 nm, 708~714 nm),筛选的光谱指数为RVI(520,710); NDVI的 $R^2>0.6$ 的波段组合范围为(510~555 nm, 708~

714 nm),筛选的光谱指数为NDVI(530,710)。

(3)随机选取50个样本建立了BP神经网络模型, R^2 为0.681, RMSE为8.001,并对模型进行了检验, R^2 为0.801, RMSE为4.430,表明BP神经网络模型对烟草叶片镉含量具有良好的预测效果。

参考文献:

- [1] Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 389(1):37-45.
- [2] Zeng F R, Mao Y, Cheng W D, et al. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(2):309-314.
- [3] Raiesi F, Razmkhah M, Kiani S. Salinity stress accelerates the effect of cadmium toxicity on soil N dynamics and cycling: Does joint effect of these stresses matter? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 153:160-167.
- [4] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L.[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1):103-107.
- [5] 薛永, 王苑嫒, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):528-534. XUE Yong, WANG Yuan-yuan, YAO Quan-hong, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2014, 23(3):528-534.
- [6] 马新明, 李春明, 刘海涛, 等. Cd Pb污染对烤烟ATP酶活性及烟叶品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2):708-712. MA Xin-ming, LI Chun-ming, LIU Hai-tao, et al. Effect of Cd, Pb Pollution on ATPase activity and quality of tobacco leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):708-712.
- [7] 李荣春. Cd、Pb及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2):238-242. LI Rong-chun. Effect of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(2):238-242.
- [8] 袁祖丽, 马新明, 韩锦峰, 等. 镉污染对烟草叶片超微结构及部分元素含量的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11):2919-2927. YUAN Zu-li, MA Xin-ming, HAN Jin-feng, et al. Effect of Cd contamination on ultramicroscopic structure and some elements content of tobacco leaves [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11):2919-2927.
- [9] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd、Fe及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. *生态学报*, 1992, 12(2):147-154. LI Yuan, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Effects of Cd, Fe and their compound pollution on several physiological indexes of tobacco leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 12(2):147-154.
- [10] 吴坤, 吴中红, 邵付菊, 等. 镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(16):4517-4524. WU Kun, WU Zhong-hong, TAI Fu-ju, et al. Effects of cadmium stress on hormone level, photosynthetic characteristics and fluorescence characteristics of tobacco leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16):4517-4524.
- [11] 曹玉巧, 邵慧芳, 许自成, 等. 镉对烟草的胁迫与烟叶控镉措施研究进展[J]. *山西农业科学*, 2017, 45(11):1877-1882. CAO Yu-qiao, SHAO Hui-fang, XU Zi-cheng, et al. Effects of cadmium on tobacco and cadmium control measures in tobacco leaves[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(11):1877-1882.
- [12] 李岚涛, 申凤敏, 马文连, 等. 镉胁迫下菊苣叶片原位高光谱响应特征与定量监测研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3):146-155. LI Lan-tao, SHEN Feng-min, MA Wen-lian, et al. Response characteristics and quantitative monitoring models analyzed using in situ leaf hyperspectra under different Cd stress conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3):146-155.
- [13] 刘来, 张文君, 王卫红, 等. 镉污染油菜叶片的反射光谱响应与镉含量估计模型[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(1):46-52. LIU Lai, ZHANG Wen-jun, WANG Wei-hong, et al. Estimation models for spectral response and cadmium contents in leaves of *Brassica napus* L[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(1):46-52.
- [14] 关丽, 刘湘南, 程承旗. 土壤镉污染环境下水稻叶片叶绿素含量监测的高光谱遥感信息参数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10):2713-2716. GUAN Li, LIU Xiang-nan, CHENG Cheng-qi. Research on hyperspectral information parameters of chlorophyll content of rice leaf in Cd-polluted soil environment[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10):2713-2716.
- [15] 孙小香, 王芳东, 赵小敏, 等. 基于冠层光谱和BP神经网络的水稻叶片氮素浓度估算模型[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(3):35-44. SUN Xiao-xiang, WANG Fang-dong, ZHAO Xiao-min, et al. The estimation models of rice leaf nitrogen concentration based on canopy spectrum and BP neural network[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(3):35-44.
- [16] Chen L, Huang J F, Wang F M, et al. Comparison between back propagation neural network and regression models for the estimation of pigment content in rice leaves and panicles using hyperspectral data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(16):3457-3478.
- [17] 贾方方, 张黎明, 任天宝, 等. 基于BP神经网络的烟草叶片质体色素高光谱反演[J]. *烟草科技*, 2016, 49(7):8-13. JIA Fang-fang, ZHANG Li-ming, REN Tian-bao, et al. Hyperspectral inversion to estimate plastid pigment contents in tobacco leaves based on BP neural network[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2016, 49(7):8-13.
- [18] 周琼, 杨红云, 杨珺, 等. 基于BP神经网络和概率神经网络的水稻图像氮素营养诊断[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1):134-141. ZHOU Qiong, YANG Hong-yun, YANG Jun, et al. Feasibility study of BP neural network and probabilistic neural network for nitrogen nutrition diagnosis of rice images[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1):134-141.
- [19] 黄林生, 江静, 黄文江, 等. Sentinel-2影像和BP神经网络结合的小麦条锈病监测方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17):178-185. HUANG Lin-sheng, JIANG Jing, HUANG Wen-jiang, et al. Wheat yellow rust monitoring method based on Sentinel-2 image and BPNN model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17):178-185.
- [20] 刘俊, 孟庆岩, 葛小三, 等. 基于BP神经网络的夏玉米多生育期叶

- 面积指数反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 174-184.
- LIU Jun, MENG Qing-yan, GE Xiao-san, et al. Leaf area index inversion of summer maize at multiple growth stages based on BP neural network[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 174-184.
- [21] 侯雨, 曹丽英, 丁小奇, 等. 基于边缘检测和BP神经网络的大豆杂草识别研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 185-190. HOU Yu, CAO Li-ying, DING Xiao-qi, et al. Research on soybean weed recognition based on edge detection and BP neural network[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(7): 185-190.
- [22] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. *Ecology*, 1969, 50(4): 663-666.
- [23] Rouse J W, Hass R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]//Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt: 1974: 310-317.
- [24] 赵景龙, 张帆, 万雪琴, 等. 早开堇菜对镉污染的耐性及其富集特征[J]. 草业科学, 2016, 33(1): 54-60. ZHAO Jing-long, ZHANG Fang, WAN Xue-qin, et al. Cadmium tolerance and enrichment characteristics of *Viola prionantha*[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 54-60.
- [25] 陈丽鹃, 周冀衡, 李强, 等. 镉对烟草的毒害及烟草抗镉机理研究进展[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(6): 93-97. CHEN Li-juan, ZHOU Ji-heng, LI Qiang, et al. Advance in cadmium toxicity to tobacco and its resistance mechanism[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(6): 93-97.
- [26] 高伟. 镉胁迫下两种叶菜类蔬菜的叶片高光谱特征及生理参数模拟[D]. 重庆: 西南大学, 2012. GAO Wei. Hyperspectral characteristics and simulation some physiological parameters of leafy vegetables under cadmium stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [27] 顾艳文, 李帅, 高伟, 等. 基于光谱参数对小白菜叶片镉含量的高光谱估算[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4445-4453. GU Yan-wen, LI Shuai, GAO wei, et al. Hyperspectral estimation of the cadmium content in leaves of *Brassica rapa Chinesis* based on the spectral parameters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13): 4445-4453.