

刁智华,袁万宾,刁春迎,等. 病害特征在作物病害识别中的应用研究综述[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):71-74.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.018

病害特征在作物病害识别中的应用研究综述

刁智华,袁万宾,刁春迎,毋媛媛

(郑州轻工业学院电气信息工程学院/河南省信息化电器重点实验室,河南郑州 450002)

摘要:病害特征指作物在感染上病害时,在生理、形态和结构上发生病变特征,而病害识别则是利用提取出的作物病害特征来对作物进行病害识别,通常在病害形状、纹理和颜色作为识别特征的 3 个重要指标。将图像处理技术应用到病害特征提取识别中的研究与发展,分别从形状、颜色、纹理的特征提取出发,基于部分学习方法的病害识别,对近些年作物病害特征提取识别的应用研究进行综述,分析几种特征在病害识别研究中的优势与不足,并对病害特征在农业检测识别应用的前景进行展望。

关键词:图像处理;病害特征;特征提取;病害识别;优势;不足

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0071-04

我国是一个农业大国,拥有悠久的发展历史,但农业自动化生产程度并不高。不能及时获取作物生长期间的信息,从而进行有效的生产管理,这一直是困扰我国农业发展水平低的一个重要原因。在传统的获取农业信息中,农业专家通过定期去田间观察,依靠视觉对植物生长进行评估,通过长期积累的经验来对作物病害程度进行判断。这种方法虽然可以解决农作物生长中的一些问题,但对未来农业自动化生产并不适用,既需要大量农业专家,又浪费时间,而且还不能对作物生长的实时信息作出正确的判断。因此,迫切须要一种方法来解决该问题。数字图像处理技术,简而言之就是利用计算机对图像进行处理,来达到所需要的效果。利用计算机将图像信号转化为数字信号并加以处理,提高图像效果是图像处理的目的。随着计算机的飞速发展,图像处理技术发展也得到了很大的提高,在生活各个领域中均有应用,如航空航天、军事活动、医学研究、工业生产和农业生产等。图像处理技术尤其给农业自动化带来质的提升,其技术在农作物种子分类、农产品的质量检测、生长阶段的缺素识别检测以及病害程度识别等均有应用。作物病害会影响作物生长,与正常植株产生一定的差异,利用图像处理技术可以更好地观察差异,及时有效地获取作物生长和病害程度信息,避免农害对作物产量的影响。基于图像处理的病害识别技术一般包括图像预处理(图像去噪、增强、平滑、锐化)、图像分割、特征提取、图像识别。图像分割的效果影响着特征提取,而图像特征提取是图像处理技术的关键,特征提取决定着病害识别的结果,从而影响着对作物病害的控制。目前,图像特征的提取没有明确的定义,特征的提取种类各种各样,提取的难易程度和效果也不相同。常用的病害特征有形状特征、颜色特征、纹理特征。在

处理作物病害图像时,形状特征、颜色特征、纹理特征具有不同的特征表现,不同的病害特征在病害识别中起不同的作用,既具有优势也拥有许多不足,造成病害特征提取困难。选择一种合适的病害特征或者综合病害特征,可以有效地对作物病害进行诊断,从而更加高效地识别作物病害。因此,利用病害特征提取技术在农业检测识别方面的研究具有很大意义。

1 病害特征的分类应用

特征选择是病害图像处理的关键,病害特征的选择影响着病害识别。作物感染病害时,病害作物在形状、颜色、纹理等与正常植株有着明显的病理特征差异。近年来,大量研究人员利用形状特征、颜色特征、纹理特征进行相关试验研究,分析各病害特征的特点,并且取得了一定的研究成果。

1.1 基于形状特征的应用

形状表示物体的存在和表现形式,形状是描述图像非常重要的一个特征,具有非常明显的特征表现。相较于颜色和纹理特征,形状特征的表达必须以对图像中物体或区域的划分为基础。形状特征提取方法通常以轮廓特征和区域特征来表示,轮廓特征利用了物体的边界描述特征,而区域特征则描述了整个形状区域。

在形状特征方面,国内外学者做了一些有益的探索,并取得了部分研究成果。史智兴等将图像处理技术应用到玉米研究中,提取了玉米籽粒的白色部分与黄色部分的面积,定义了白色部分与黄色部分的面积比,发现该黄白比在进行玉米识别中具有显著作用^[1]。胡维炜等对大豆作物的病害程度进行评估,提出大豆叶面相对病斑面积法,结果表明,计算的大豆叶面相对病斑面积可以很好地对病害程度进行评估^[2]。刁智华相较于传统的形状参数特征,将不变矩引入到形状特征中,用 7 个 hu 不变矩来作为病害诊断的形状特征^[3]。Zhu 等从分割的叶片中提取了面积、周长、矩形、圆形度和形状复杂度等作为形状特征参数,对 30 张玉米病害图像进行识别,识别率可达 80%^[4]。王雪等选取定义了位置和方向、偏心率等特征参数,结合一些其他特征参数进行了黄瓜霜霉病自动识别研究,该系统识别效果良好^[5]。邵庆等利用图像处理技

收稿日期:2017-12-18

基金项目:河南省科技厅科技攻关(编号:162102110118);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(编号:2016GGJS-088)。

作者简介:刁智华(1982—),男,河南夏邑人,博士,副教授,主要从事农作物病害识别及精准喷药技术有关研究。E-mail: diaozhua@163.com。

术研究了小麦条锈病,计算了病斑的矩形度、圆形度、纵横比、面积和周长等 5 个特征量,作为病斑的形状特征,为病害诊断系统提供了数据信息^[6]。李先锋等利用形状特征对作物与杂草进行了识别研究,选取了基本几何特征,无量纲几何特征、hu 矩特征等参数^[7]。结果表明,优化后的混合特征可以精确地将作物与杂草识别出来,优化了形状特征在农田杂草识别技术。杭腾等测定了番茄的茎粗、株高、果实的横截面积等特征对番茄长势信息进行实时监测,更加详细地描述了作物的生长信息^[8]。Jia 等在黄瓜细菌角叶斑病和霜霉病研究中提取了形态特征,结果表明,基于形状特征的黄瓜叶斑病识别方法的应用性^[9]。Yousefi 等将旋转不变小波描述子引入来描述形状特征,与椭圆傅里叶描述叶形状比较,该形态特征具有较好的分类表现^[10]。

基于形状特征在农作物病害识别方面应用广泛,提取一些形状特征明显的病害识别效果良好,但面对一些非常复杂的形状特征难以提取识别时,须要考虑病害形状特征的识别效果,如形状特征处理形变图像的效果比较一般。另外,图像分割的效果会直接影响形状特征参数的提取,寻找合适的病斑分割方法是提取形状特征的一个关键部分。

1.2 基于颜色特征的应用

颜色特征是一种全局特征,颜色特征体现了物体的表面性质,通常观察叶部的颜色可以判断一些农作物的长势信息。相对于形状特征,颜色特征提取更加高效,面对一些分割困难的图像,可以用颜色特征来识别特征,而且颜色特征对图像的方向和大小变化不敏感。因此,利用颜色特征提取识别,可以很好地判断作物生长情况。

在颜色特征方面,国内外研究者投入了一定的精力,取得了可喜的科研成就。Zou 等提取了 17 个颜色特征建立了基于公式表达树的组织特征参数,最后实现了苹果的自动色彩分级^[11]。王美丽等选取小麦常见叶部病害图像,基于 HSV [hue(色调)、saturation(饱和度)、value(明度)]颜色空间的 H、S 分量作为颜色特征,利用小麦白粉病和锈病的颜色差距将这 2 种病害分离识别^[12]。毋媛媛针对 RGB 和 HSI 颜色空间,重新定义了 RGB 到 HSI 的转换公式,并从中提取了颜色特征分量,作为小麦叶部病害智能识别系统中颜色特征^[13]。谢泽奇提取了关于 RGB 和 HSI 分量的均值、方差、偏度、峰值等多个颜色特征,选择出 6 个特征结合分类器对病害识别^[14]。结果表明,利用 RGB 和 HSI 分量的颜色特征识别度很高,为黄瓜病害识别算法提供了方法。王若兰以霉变玉米为研究对象,根据霉变程度颜色的变换,提取颜色特征来了解霉变的程度^[15]。Stricker 等提出了 1 种表示颜色特征的方法,称为颜色矩,有一、二、三阶矩等,颜色信息主要分布在一、二阶矩等低阶矩中^[16]。夏永泉等将颜色矩应用到 RGB 颜色空间中,分别提取了 RGB 空间各分量的一二阶矩共 6 个颜色特征作为农田小麦病害诊断的特征^[17]。崔艳丽等将图像特征提取技术应用到黄瓜病害研究,分别提取了色调 H、色调直方图统计特征参数以及百分率直方图等颜色特征。结果表明,百分率直方图提取的颜色特征可以解决叶片形状大小的影响,直方图统计分析的色调 H 偏度颜色特征具有较好的效果^[18]。胡敏等将模糊量化直方图、颜色聚合度作为病害的颜色特征,结合利用颜色共生矩阵提取的特征对玉米病害识别

研究^[19]。

颜色特征对农作物病害识别具有重要的参考价值,作物病害在颜色种类和程度上最为直接明显,因此广泛地应用于病害诊断和程度鉴定。目前,一般颜色特征是图像区域内所有的像素点的统计,不能很好地表示图像的局部特征,造成识别颜色相近的病害效果较差。而且图像清晰度影响着基于颜色特征的提取,容易受到环境的干扰。因此,基于颜色特征的提取须要进一步的研究。

1.3 基于纹理特征的应用

纹理是图像的基本属性之一,它具有一定规律的排列表达,是物体表面特征体现的重要部分。纹理通过像素和某一空间的灰度分布表达了颜色和灰度的变化,是一种不依赖于颜色或亮度的视觉特征^[20]。纹理作为视觉的感知形式的重要组成部分,具有非常明显的优势。因此,可以通过提取纹理特征来分析作物病害。

研究人员对纹理特征进行了研究,并取得了一定的研究成果。田有文基于国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage,简称 CIE)XYZ 颜色空间的上提出了表达色度图和色度值的二维分布的色度矩,在以此为特征向量对葡萄病害进行识别,可以作为葡萄病害识别参考方法^[21]。陈兵旗等将每一个像素作为目标像素计算其局部二值模式(local binary pattern,简称 LBP),并得到纹理矩阵图像进行图像分割,分割效果良好^[22]。杨倩等利用改进的 LBP 算子均匀模式进行纹理特征提取,该方法降低了特征向量的维数,提高了识别分类的准确度^[23]。王树文等从灰度梯度共生矩阵中提取了能量、相关性、同次性和差异性 4 个纹理特征参数,作为黄瓜病害识别系统的特征参数^[24]。张静等利用灰度共生矩阵提取出多个特征参数,并用直方图筛选出最优特征参数。结果表明,提取出的惯性值纹理特征可以诊断斑疹病和角斑病^[25]。毛罕平等在叶片番茄缺素的研究中,分别利用差分算子、傅里叶变换、小波包提取了纹理在时域、频域、时频域的特征,结合遗传算法进行优化选择,选择出了优化组合,识别率较高^[26]。Bakhshipour 等利用小波变换构建了同现矩阵,从而定义了小波纹理特征。结果表明,基于小波纹理特征的杂草识别精度高^[27]。王怀宇等提取了综合灰度共生矩阵和统计矩的纹理特征,对玉米苗期的田间杂草识别,该系统可以满足杂草识别要求^[28]。Rojas 利用灰度共生矩阵结合主成分分析法选取了 10 个纹理特征参数,作为蔬菜和杂草分类系统的特征参数,具有很好的效果^[29]。

基于纹理特征的病害研究,在病害、杂草识别等应用中具有广阔的应用市场。与颜色特征一样,纹理特征提取会受环境影响,光照、反射和图像清晰度等因素会造成纹理特征计算误差。但纹理特征体现了物体表面规律性属性,当提取图像纹理信息清晰时,纹理特征提取识别非常的高效有用。基于纹理特征的提取识别需要更多的研究。

1.4 基于混合特征的应用

混合特征是将形状特征、颜色特征、纹理特征结合到一起,充分利用各个特征的特点,更加完整详细地描述病害信息。混合特征相比于单一特征,弥补了单个特征的描述不足,从而更加高效地对作物病害进行管理。

许多学者对基于形状、颜色、纹理等综合特征提取的作物

病害图像处理进行了大量的研究和分析。基于形状、颜色、纹理等特征在农作物检测管理中使用广泛,但单一的特征参数已经不能满足一些复杂的农情情况,利用形状、颜色、纹理等综合特征结合一些学习算法,可以更好地诊断病害,提高精确度。师韵等通过病斑分割提取了综合特征,分析并降低了特征维数,识别了苹果落叶病、花叶病、锈病等3种常见疾病^[30]。刘君等从病斑特征中提取了多个混合特征向量,对叶部病害进行诊断。该系统适用于黄瓜、番茄等园艺性作物病害诊断^[31]。邓继忠等结合形状和纹理特征对小麦网腥、印度腥、矮腥3种病害进行分类识别研究。试验表明,结合支持向量机的识别系统具有较高的识别率^[32]。秦丰等在病斑图像中提取了形状、颜色、纹理等综合特征参数,识别苜蓿4种病害,为苜蓿叶部病害识别提供了特征参数^[33]。田凯等分析了病斑的形状、颜色、纹理等特征,并通过方差和主成分分析法优选了20个特征参数作为特征向量,结合Fisher判别函数对茄子褐纹病病害进行识别。试验表明,该识别方法可以对茄子褐纹病进行诊断,减少褐纹病对茄子的影响^[34]。Zhang等在黄瓜的病害识别中,从病害图像中提取了关于形状和颜色的特征参数,利用稀疏表示的稀疏特性降低了计算量,提高了对黄瓜病害的识别^[35]。马浚诚等同样提取了混合特征对黄瓜霜霉病进行识别研究,采用粗糙集方法优化特征参数,加快了对病害识别的速率,满足蔬菜叶部病害诊断的需求^[36]。刘涛等在形状、纹理和颜色特征的基础上又提出病健交界特征,丰富了混合特征,弥补了相似病斑的区分度不足的缺陷^[37]。Dewi等对甘蔗叶片的特征组合进行了分析研究,基于混合特征的识别率远远高于单一特征提取的病害识别^[38]。凌秀华等从麦冬药材表面图像提取了混合特征,又将药材横切面特征加入了特征描述中,促进了特征提取的广泛性,有利于更好的图像信息提取^[39]。

基于形状、颜色、纹理特征参数的结合更好地描述病害特征,提高了病害特征提取的完整性,而且基于综合特征的识别系统更适合复杂的农田情况。但过多的特征参数会增加大量计算,加大建立识别模型的难度。选择最优的特征向量,充分描述病害的信息情况,才会更有利于应用到作物病害识别中。

2 存在的问题及未来研究方向

目前,结合形状、颜色和纹理特征的病害识别研究取得了一定的成果,但面对复杂的田间作物病害情况,现有的病害特征提取技术无法提供更加全面的农情信息,还存在一些问题:(1)基于病害特征的选择比较固定化,大多数采用叶部病斑的形状、颜色、纹理等特征选择特征参数,特征参数单一化,而且没有考虑农作物其他部位的病害特征,导致信息比较匮乏。可以结合植物病理学,从作物多部位提取病害特征。多角度、多元化的特征提取成为未来研究的一个方向。(2)过少的病害特征描述信息不完整,而过多的特征参数会加大模型计算的难度,选择最优特征参数向量关系着识别方法的准确度。目前,还没有一种识别方法可以识别多数农作物病害,提高识别方法的适用性和准确度也是一个重点。(3)大多数病害特征提取识别是基于某一时刻的病害特征识别,是在静态条件下完成的。关于建立一个完整周期内的病害识别的模型研究还比较少。充分利用各时期的特征变换规律,建立一个关于

时间变量对农作物病害进行任意时刻识别的模型,是下一步的研究重点。

3 结论

随着图像处理技术的快速发展,利用图像处理技术在病害识别研究应用得越来越广泛,而病害特征的提取成为图像病害识别的关键。从形状、颜色、纹理等特征选择,对近些年国内外的专家学者在农作物病害特征提取识别领域的研究做了一个比较全面的综述。可见,无论是某单一特征还是综合特征都可以对病害进行识别,但识别的效果参差不齐,这取决于病害特征的选择。在今后的一段时间里,病害特征提取在病害识别的应用需要不断发展,特征提取方法的创新成为该领域的一个重点。

利用病害图像特征提取识别技术在进行农作物病害识别时尽管存在一些问题,但也取得了一定的成果。如何更好地利用图像处理技术对农作物病害信息进行提取管理,具有重要的意义和远大的前景。

参考文献:

- [1] 史智兴,程洪,李江涛,等. 图像处理识别玉米品种的特征参数研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):193-195.
- [2] 胡维炜,张武,刘连忠,等. 利用图像处理技术计算大豆叶片相对病斑面积[J]. 江苏农业学报,2016,32(4):774-779.
- [3] 刁智华. 大田小麦叶部病害智能诊断系统研究与应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [4] Zhu J H, Wu A, Li P. Corn leaf diseases diagnostic techniques based on image recognition [M]//Communications and Information Processing. Heidelberg: Springer,2012:334-341.
- [5] 王雪,马卓,王欣,等. 基于颜色和形状特征的黄瓜霜霉病自动识别研究[J]. 安徽农业大学学报,2013,40(6):1071-1075.
- [6] 邵庆,张楠,路阳. 小麦病害图像识别处理及形状特征提取研究[J]. 农机化研究,2013(8):35-37,42.
- [7] 李先锋,朱伟兴,纪滨,等. 基于图像处理和蚁群优化的形状特征选择与杂草识别[J]. 农业工程学报,2010,26(10):178-182.
- [8] 杭腾,毛罕平,张晓东,等. 基于机器视觉的番茄长势信息无损检测的研究[J]. 农机化研究,2015(11):192-197.
- [9] Jia J, Ji H. Recognition for cucumber disease based on leaf spot shape and neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(25):115-121.
- [10] Yousefi E, Baleghi Y, Sakhaei S M. Rotation invariant wavelet descriptors, a new set of features to enhance plant leaves classification[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2017,140:70-76.
- [11] Zou X B, Zhao J W, Li Y X. Apple color grading based on organization feature parameters [J]. Pattern Recognition Letters, 2007,28(15):2046-2053.
- [12] 王美丽,牛晓静,张宏鸣,等. 小麦叶部常见病害特征提取及识别技术研究[J]. 计算机工程与应用,2014,50(7):154-157.
- [13] 毋媛媛,李清波,刁智华. 小麦叶部病害彩色图像特征提取研究[J]. 农机化研究,2015(10):79-82.
- [14] 谢泽奇,张会敏,张善文,等. 基于颜色特征和属性约简的黄瓜病害识别方法[J]. 江苏农业学报,2015,31(3):526-530.

- [15]王若兰,赵炎,张令,等. 玉米霉变与其图像颜色特征参数之间的相关性研究[J]. 粮食与饲料工业,2015(2):13-16.
 - [16]Stricker M, Orengo M. Similarity of color images[C]//Storage and Retrieval for Image and Video Databases III. International Society for Optics and Photonics,1995:381-393.
 - [17]夏永泉,李耀斌,李晨. 基于图像处理技术的小麦叶部病害识别研究[J]. 科技通报,2016,32(4):92-95.
 - [18]崔艳丽,程鹏飞,董晓志,等. 温室植物病害的图像处理及特征值提取方法的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊2):32-35.
 - [19]胡敏,陈红波,许良凤,等. 基于颜色和纹理特征的黄瓜病害识别算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):970-977.
 - [20]吕腾腾. 基于支持向量机的小麦病害识别研究[D]. 泰安:山东农业大学,2015.
 - [21]田有文. 基于纹理特征和支持向量机的葡萄病害的识别[J]. 仪器仪表学报,2005,26(S1):606-608.
 - [22]陈兵旗,郭学梅,李晓华. 基于图像处理的小麦病害诊断算法[J]. 农业机械学报,2009,40(12):190-195.
 - [23]杨倩,高晓阳,武季玲,等. 基于颜色和纹理特征的大麦主要病害识别研究[J]. 中国农业大学学报,2013,18(5):129-135.
 - [24]王树文,张长利. 基于图像处理技术的黄瓜叶片病害识别诊断系统研究[J]. 东北农业大学学报,2012,43(5):69-73.
 - [25]张静,王双喜,董晓志,等. 基于温室植物叶片纹理的病害图像处理及特征值提取方法的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2006,37(3):282-285.
 - [26]毛罕平,徐贵力,李萍萍. 番茄缺素叶片的图像特征提取和优化选择研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):133-136.
 - [27]Bakhshipour A, Jafari A, Nassiri S M. Weed segmentation using texture features extracted from wavelet sub-images[J]. Biosystems Engineering,2017,157:1-12.
 - [28]王怀宇,李景丽. 基于纹理特征的玉米苗期田间杂草识别[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):143-145.
 - [29]Rojas C P, Leonardo S G, Toledo N V. Weed recognition by SVM texture feature classification in outdoor vegetable crops images[J]. Ingeniería E Investigación,2017,37(1):68-74.
 - [30]师韵,王旭启,张善文. 基于主分量分析的苹果叶部3种常见病害识别方法[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):337-340.
 - [31]刘君,王振中,李宝聚,等. 基于图像处理的作物病害自动识别系统的研究[J]. 计算机工程与应用,2012,48(13):154-158,180.
 - [32]邓继忠,李敏,袁之报,等. 基于图像识别的小麦腥黑穗病害特征提取与分类[J]. 农业工程学报,2012,28(3):172-176.
 - [33]秦丰,刘东霞,孙炳达,等. 基于图像处理技术的四种苜蓿叶部病害的识别[J]. 中国农业大学学报,2016,21(10):65-75.
 - [34]田凯,张连宽,熊美东,等. 基于叶片病斑特征的茄子褐纹病识别方法[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊1):184-189.
 - [35]Zhang S, Wu X, You Z, et al. Leaf image based cucumber disease recognition using sparse representation classification[J]. Computers & Electronics in Agriculture,2017,134:135-141.
 - [36]马浚诚,温皓杰,李鑫星,等. 基于图像处理的温室黄瓜霜霉病诊断系统[J]. 农业机械学报,2017,48(2):195-202.
 - [37]刘涛,仲晓春,孙成明,等. 基于计算机视觉的水稻叶部病害识别研究[J]. 中国农业科学,2014,47(4):664-674.
 - [38]Dewi R K, Ginardi R H. Feature extraction for identification of sugarcane rust disease [C]//International Conference on Information, Communication Technology and System (ICTS),2014:99-104.
 - [39]凌秀华,卢文彪,王耐,等. 基于图像处理技术的麦冬药材特征提取与识别[J]. 辽宁中医杂志,2017(7):1460-1462.
- (上接第58页)
- [29]Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China [J]. Agronomy Journal,2013,105(1):277-284.
 - [30]Pan B B, Lam S K, Mosier A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis [J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2016,232:283-289.
 - [31]Sun H J, Zhang H L, Min J, et al. Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater [J]. Paddy and Water Environment, 2016,14(1):105-111.
 - [32]Wang H H, Hegazy A M, Jiang X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea [J]. Agronomy Journal,2016,108(3):1214-1224.
 - [33]蒋炳仲,李大红,李鸿雁. 2006—2014年驻马店地区农业源大气氨排放量变化[J]. 江苏农业学报,2017,33(1):100-106.
 - [34]宋勇生,范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境,2003,12(2):240-244.
 - [35]武岩,红梅,林立龙,等. 不同施肥措施对河套灌区盐化潮土氨挥发及氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤,2017,49(4):745-752.
 - [36]曹金留,田光明,任立涛,等. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失[J]. 南京农业大学学报,2000,23(4):51-54.
 - [37]Schlesinger W H, Hartley A E. A global budget for atmospheric NH₃ [J]. Biogeochemistry,1992,15(3):191-211.
 - [38]杨震,朱兆良,蔡贵信,等. 表面成膜物质抑制水稻田中氮挥发的研究[J]. 土壤学报,1995,32(增刊2):160-165.
 - [39]De Datta S K, Buresh R J, Obcemea W N, et al. Nitrogen-15 balances and nitrogen fertilizer use efficiency in upland rice [J]. Fertilizer Research,1990,26(1/2/3):179-187.
 - [40]Han K, Zhou C J, Wang L Q, et al. Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation system [J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(5):1099-1112.
 - [41]Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements [J]. Paddy and Water Environment,2011,9(3):333-342.
 - [42]闫德智,王德建,林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响[J]. 土壤学报,2005,42(3):440-446.
 - [43]Ishii S, Ikeda S, Minamisawa K, et al. Nitrogen cycling in rice paddy environments: past achievements and future challenges [J]. Microbes and Environments,2011,26(4):282-292.