

近 20 年农田精准管理分区施肥方法研究进展

鲍依临¹, 孟祥添¹, 刘焕军^{1,2*}, 殷悦¹, 马雨阳¹, 邱政超³, 赵明明⁴

(1. 东北农业大学 公共管理与法学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 1300121; 3. 中国科学院 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 4. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所农业技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 精准管理分区 (Site Specific Management Zones, SSMZ) 是精准农业中实现定时、定点、定量、定配方投入水肥药等农业生产资料的关键环节。SSMZ 已经在精准农业中得到了迅速的发展与应用, 该技术对于减少农业投入、提高经济效益及减轻农业面源污染具有重要意义。全面地认识 SSMZ 的研究现状及存在问题, 有利于更好地把握 SSMZ 的发展动态并开展更进一步的研究。本文对国内外以 SSMZ 为主题的论文进行了梳理, 概述了 SSMZ 研究中不同输入量的应用原理、数据类型、优势及局限性; 其次, 对现有的分区方法进行了总结归纳, 最后, 整理了常用的 SSMZ 评价方法, 对不同评价方法进行分析, 进行总结与展望。得到如下结论: (1) SSMZ 输入量由基于空间插值映射土壤空间属性, 过渡为利用遥感技术获取土壤、植被等相关信息; (2) 随着大数据时代的到来, 综合考虑历史土壤理化性质、成土要素、农作物时空动态、水土气生地形地貌的作用有助于提升 SSMZ 的精度; (3) 基于近端传感器及无人机获取的密集数据的研究不断增加, 田块尺度的空间信息精度高, 连续性增强; (4) 传统的非监督分类算法逐步被面向对象分割方法取代, 分区结果更有助于指导田间管理措施; (5) 用于 SSMZ 的评价信息以与作物生长关系密切的土壤属性或表征作物长势的参数为主。国内外对于 SSMZ 的关注度逐渐增加, 各类 SSMZ 研究成果对于实现绿色农业、维护生态安全具有重要实践意义。

关键词: 精准管理分区; 输入量; 多源数据; 分区方法; 评价方法

中图分类号: S127; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)04-0988-12

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020110201

鲍依临, 孟祥添, 刘焕军, 殷悦, 马雨阳, 邱政超, 赵明明. 近 20 年农田精准管理分区施肥方法研究进展 [J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 988-999

BAO Yi-lin, MENG Xiang-tian, LIU Huan-jun, YIN Yue, MA Yu-yang, QIU Zheng-chao, ZHAO Ming-ming. Review on Site-Specific Management Zone for Zonal Fertilization Delineation in Last 20 Years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 988-999

近年来, 为满足骤增的人口对粮食的需求, 大量的土地被过度开发, 农民通常将整个区域进行统一的施肥, 或依据经验对贫瘠的土壤加大施肥量, 产量提升的背后是土地功能的日渐衰退^[1], 导致土壤养分含量迅速下降, 如此往复的恶性循环带来的负面作用不仅限于土壤。精准管理分区 (Site Specific Management Zones, SSMZ) 是根据田块的空间变异性和实际需求, 将田块分成若干个不同均质性的子田块, 进行定时、定点、定量、定配方地调整土壤和作物的管理措施^[2], 属于精准农业的关键环节。该理念的提出旨在实现精准变量施肥, 减少农业投入, 提升土壤质量, 最大限度地提升耕地资源潜力, 对于提升土地产能, 保障粮食安全方面具有重要的意义。从经济学的角度而言, SSMZ 能够有效地控制投

入成本并提升经济效益, 更好地减少开支、监测食物链、助力农业生产规划的“可持续集约化”, 使区域内的自然环境系统与生态系统处于动态平衡^[3]。

SSMZ 通常依据不同类型的土壤信息进行划分, 为确保 SSMZ 的鲁棒性, 一般选择具有代表性的土壤属性。在美国, 最早的 SSMZ 始于 1985 年, 研究者们依据土壤养分的空间分布生成电子地图以供农民参考。此后, 自由路^[4]结合农村实际情况, 应用地理信息系统, 使用克里金插值技术以映射空间连续土壤信息, 建立了区域土壤养分分区管理模型。2005 年, 李翔^[5]首次将 SSMZ 定义为: “按照土壤或作物长势状况的差异性将同一地块分成不同的均质性区域进行管理”, 自此, SSMZ 领域得到了学者的关注并逐步在我国发展起来。由于 SSMZ 本身就是随着

收稿日期: 2020-11-02; 修订日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (41671438) 和黑龙江省自然科学基金 (D2017001) 资助

作者简介: 鲍依临 (1996-), 女, 辽宁喀喇沁左翼蒙古族自治县, 硕士研究生, 主要研究方向为农业遥感。E-mail: byl1211neau@yeah.net

*通讯作者: E-mail: Huanjunliu@yeah.net

3S 技术的发展而诞生的智慧产物, 因此, 在近些年 的研究中, 遥感影像、航空影像以及雷达数据的应用越来越广泛。与传统的网格采样法相比, 遥感影像信息的空间分辨率高, 时效性强, 可提取时间序列信息是遥感手段在 SSSZ 中的显著优势; 此外, 如 γ 射线、电磁感应等技术在 SSMZ 中得到了科学家们的广泛关注^[6]。

农业与环保是当今全球的热点, 而 SSMZ 的成功发展使这一技术更多地被应用至商业领域中^[7]。基于中文期刊检索来源为中国知网 (<https://www.cnki.net/>), 英文期刊检索来源为 Web of Science Expanded 核心数据库 <http://isiknowledge.com/>。本文以近 20 年来 SSMZ 的相关研究成果为综述对象, 梳理并总结了当前该领域在国内外关于输入量、分区方法、评价方法的研究进展, 此外, 对今后 SSMZ 的发展趋势进行了讨论与展望, 以期为今后 SSMZ 的应用提供参考。

1 精准管理分区输入量类型

SSMZ 的输入量选取主要面临两个核心问题, 即 (1) 应该选取哪项指标, 以及 (2) 样点密度的确定, 这两个特定问题对于 SSMZ 至关重要。应根据田间分区的生产力潜力来分析适宜的指标和样点密度。土壤和农作物数量、质量指标与产量潜力有关, 是成功实现 SSMZ 的必要条件。人工采样、卫星影像与近地传感器可以分别提供密度不等的样点信息。已有 SSMZ 的研究包括丰富的输入量, 然而, 这些研究几乎都集中于对地面信息的探索, 很少考虑地形及气象因素 (如: 日照、降水等), 而阴坡、阳坡、积温等同样对作物的长势起着不可忽略的作用。将常见的 SSMZ 输入量与获取方式进行整理:

1.1 土壤理化性质

最早的 SSMZ 输入量是对研究区土壤理化性质的模拟。在 ArcGIS 中综合土壤类型及地形特征选取采样点, 利用 GPS 定位系统找到点位置并进行土壤采样, 将土样装在布袋内, 封口带回实验室进行风干、研磨、过筛处理后对土壤养分含量进行常规化学检验。早期的土壤养分管理图是依据氮肥的空间分布进行模拟^[8-9], 其含量的高低对于提高作物产量、改善农产品质量有重要作用。而不同的作物对不同养分的需求存在差异^[10]。因此, 土壤有机质、土壤 pH 值、土壤电导率、土壤有机碳、有效氮、有效磷、

有效钾等土壤理化因素均被作为精准分区的指标要素^[11-12]。明确土壤属性的空间分异特征是精准管理分区的前提, 无论是基于传统的网格采样法, 还是遥感反演方法等均是模拟土壤养分空间特征的重要途径。

土壤保水保肥能力与土壤颗粒度密切相关, 已有研究表明: 土壤含沙量的不同是导致土壤电导率存在差异的主要原因^[13]。早些年对土壤质地的划分是通过实地考察或土壤图实现的, 有学者依据土壤类型的潜在产量将试验田划分为 4 类管理区并施用不同比例的确酸盐肥, 与均一施肥相比, 肥料总用量降低了 13%^[14]。因此, 表观电导率 (ECa) 可以有效反映混合盐的含量, 同相对海拔、土壤 pH、土壤含水量等相关性显著, 时间稳定性与空间连续性更强^[15], 对于确定各种田间参数的时空分布具有重大意义, 可用于模拟产量及指导管理分区^[16-17]。Elia Scudiero 等获取了不同耕层深度的 ECa, 结合归一化植被指数与土壤盐分, 成功地模拟了玉米产量空间变异的 53%^[18]。ECa 常用的测试方法有大地电导率仪、Veris 3100 传感器, 以及 Miller 400 D 多电极温纳阵列电阻计与电磁感应传感器获取^[19-20]。然而, 由于土壤有机质和测定颗粒组成时土壤颗粒的分散程度、溶液的温度等都对土壤颗粒分级结果有影响, 不同区域无法实现对比, 因此, 在 SSMZ 的应用中该指标并不常见。

1.2 产量指标

产量是土壤, 气候, 环境等多种要素共同作用下的综合体。产量数据通常来源于两种方式: 人工实测法及装载差分全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 接收机与产量监测传感器的联合收割机获取^[21]。前者在进行植株的选取时易受到人的主观能动性的影响, 采集植株数量有限且需耗费大量的人力物力, 绝对误差相对明显; 而近端传感器可为研究人员提供大量的产量数据, 成本低廉且便捷。为确保数据的精确与稳定, 通常采用 Yield Editor、Yield Check 软件对产量数据进行综合误差处理, 剔除由机械运行事故及人为操作不当造成的产量变异, 从而保留实际的产量变异, 使频度趋于正态分布^[22], 这也是目前用于 SSMZ 最直接有效的方式。然而, 在不同时期内, 产量变化空间差异显著, 且与 SSMZ 生产力水平不具备空间一致性^[23], 有学者表明: 至少要用 5 年的产量数据才能刻画出产量变异的规律^[24]。

在无法获取前一年产量信息的情况下，通过遥感手段获取连续多年作物生长期的信息较为容易，选取产量限制因子和归一化植被指数（Normalized Differential Vegetation Index, NDVI）用于产量的模拟，这些指数具有更强的时效性，可实现种植场管

理区域的 SSMZ [25]。现有研究通常依靠植被指数（如 NDVI，比值植被指数、环境植被指数等）表达空间植被长势差异进行 SSMZ 的划定（图 1），或是基于植被指数或者产量数据进行分区结果的验证[11]。

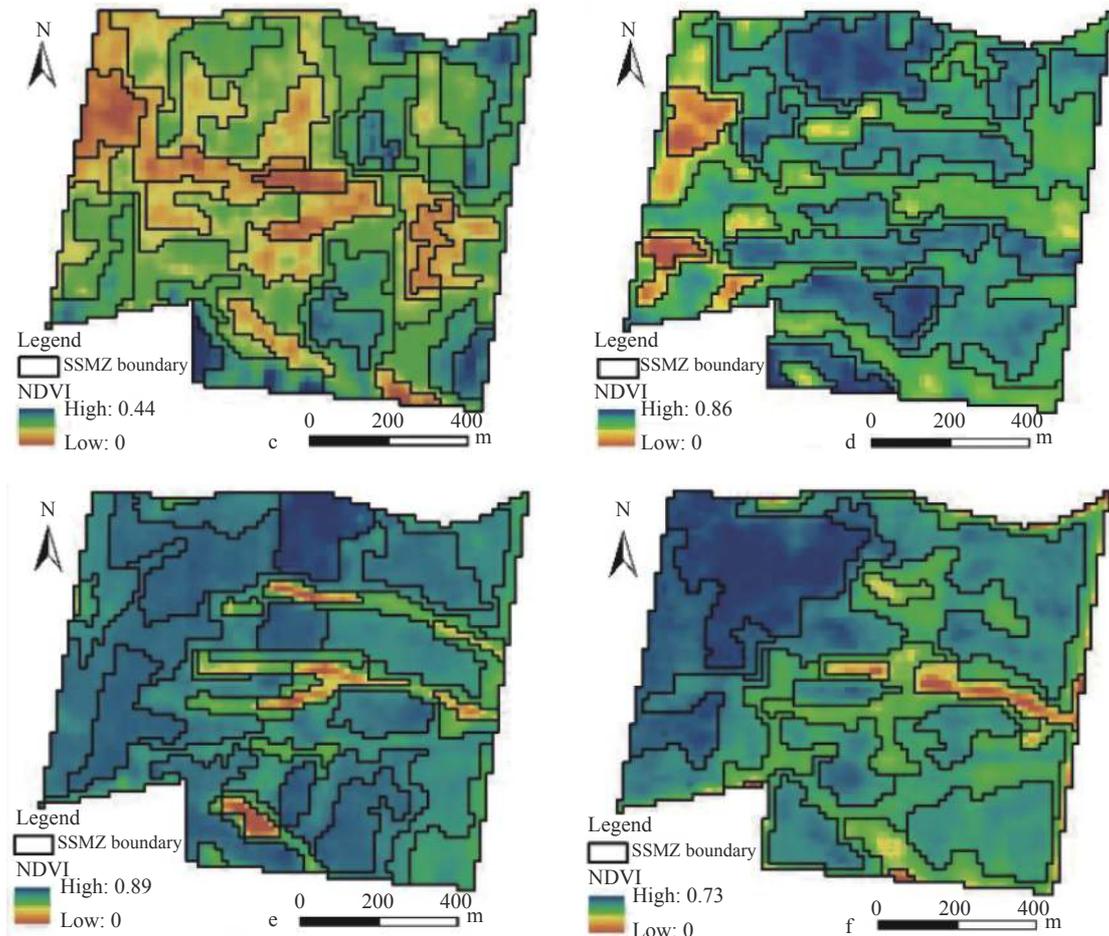


图 1 同一研究区 2013—2016 年生长期 NDVI 分区情况[26]
Fig.1 Segmentation of NDVI in the growth period from the years of 2013—2016 in the same research area[26]

通过实地采样获取土壤属性、产量等数据后，常通过空间映射的方式生成制图结果作为 SSMZ 输入量进行分区。常用的插值方法有克里金（Kriging）空间插值[27]、逆距离加权法等[28-29]。

1.3 作物生理参数

随着利用产量信息进行 SSMZ 的逐渐盛行，有学者等提出质疑：仅依据产量数据进行 SSMZ 可采纳度不高，应综合考虑作物生理参数以完善 SSMZ 的输入变量[30]。Aggelopoulou 等收集了果园内连续 3 年的土壤和果实数据，对 550 个苹果的果实重量、皮肤颜色、果肉硬度、可溶性固体含量和 pH 等指标进行分析，采用多元地统计学与聚类分析相结合的

方法，将果园进行划分，这种依据作物质量进行 SSMZ 的方法非常具有实际意义[16]。除果实性状外，虫害与作物疾病也被视为考虑因素，为了确定害虫的分布是否与 SSMZ 有关，将土地依据产量潜力划分为高、中和低三个区域，并与害虫密度进行关联，结果表明：三种潜力下的管理区与害虫的丰富程度有很好的相关性，并依据该项研究为特定地点的方式管理昆虫提供依据[31]。此外，Whetton 等对作物冠层性状、黄锈病、土壤性状和产量进行聚类分析，绘制施肥处方图，对杀菌剂的施用进行了虚拟成本-效益分析，结果表明：SSMZ 后杀菌剂的使用量减少了 22.24%，证实了 SSMZ 在降低杀菌剂成本的可行

性^[32]。作物生理参数信息是较新的输入量，是作物产量信息的延伸。然而，此类数据的获取耗时耗力，时效性不高，且由于研究区位置、作物类型、作物品种及虫害等方面差异显著，导致生理参数信息在我国的 SSMZ 领域研究有限。

1.4 不同输入量示意图

选取东北黑土区某一田块为研究区，将上述输入量的空间分布情况展示图 2 中。由于部分数据不完善，故不进行表达。图 2a 与图 2d 分别是基于空间插值与遥感反演的 SOM 空间分布图，其养分的空间分布一致，均呈现西高东低的趋势。图 2c 与图 2e 反映的土壤含水量趋势一致。对比图 2a 与图 2b，均

是通过空间插值获取的土壤养分空间分布，与遥感反演的养分空间分布相比，空间差异更为显著。图 2f 与图 2g 分别是基于 Landsat8-OLI 与 Sentinel-2A 的裸土时期标准假彩色影像，由于拍摄日期差异，土壤含水量不同，导致影像反射率具有差异。图 2h 与图 2i 为不同获取方式下的 DEM 空间分布，基于 LIDAR 测量得到的 DEM 空间分辨率更高，该特征通过图 2j 与图 2k 的对比可以得到，基于航空无人机及近端传感器不受环境（如大气）的影像，数据更为清晰，空间特征更为显著。作物生物量（图 2l）是基于 NDVI（图 2j）反演获得，空间分布具有一致性。

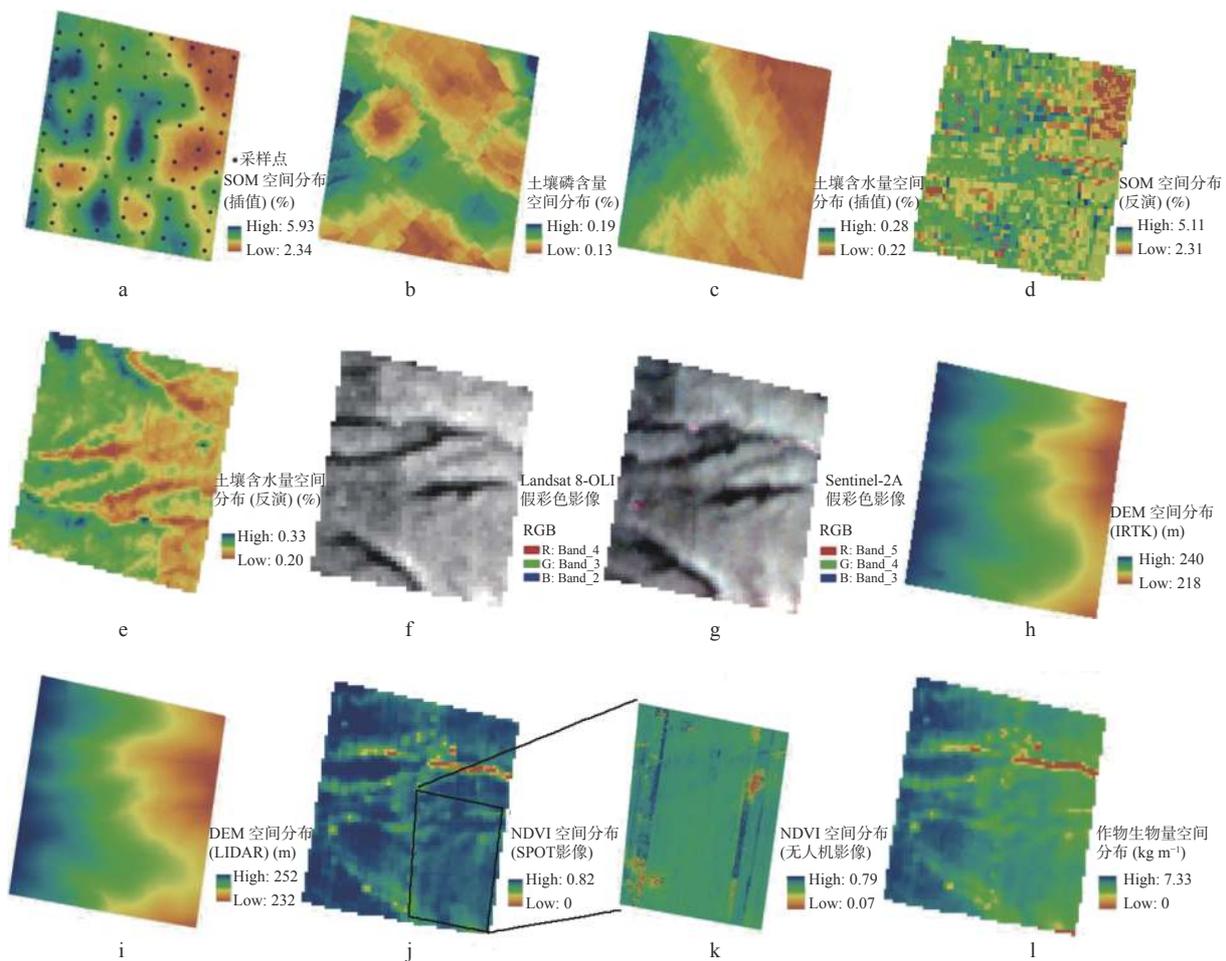


图 2 同一研究区不同输入量的表达情况
Fig.2 Expression of different inputs in the same study area

2 数据获取手段

随着 SSMZ 的发展，通过遥感手段获取输入量变得普遍。这是由于该方法不仅具有较高的精度，可以提供更高的空间分辨率；同时，克服了采样点

数量多、样点检测耗时的缺点，有利于研究区进行实时的 SSMZ。在进行 SSMZ 的过程中，与 Kriging 空间插值结果相比，遥感反演结果可以更精细地反映土壤的空间变化，实现逐像素的反演，尤其是对每个区块的边界部位有更精准的界定。

2.1 遥感卫星数据

土壤反射率在一定程度上解释了土壤养分的空间变异性^[33]。目前已有多种卫星遥感影像信息用于 SSMZ 中, 如 Landsat8-OLI, Sentinel-2, SPOT-6, 高分二号 (GF-2) 等^[34-35]。刘焕军等提出一种基于遥感影像进行 SSMZ 的方法, 以裸土时期 GF-2 高空间分辨率遥感影像作为数据源, 运用面向对象的分区方法对典型黑土区田块进行划分^[36]。Zhang 等^[37]对比分别使用土壤数据、遥感数据、遥感结合土壤数据进行 SSMZ 发现: 以遥感结合土壤数据为输入量的精度最高, 达到 91.36%; 基于土壤空间插值的精度其次, 符合度达 84.40%; 仅遥感数据进行分区的精度最低, 为 75.47%。除多光谱影像外, 其他类型的遥感数据也可以用于 SSMZ 的研究。Liu 等获取了 12 幅棉田高光谱影像, 将植被指数及光谱数据的导数处理结果作为面向对象分割的输入层进行 SSMZ。研究发现使用多光谱在 SSMZ 中更具有优势, 因为其较强的时间分辨率对 SSMZ 很重要^[38]。Breunig 等使用来自 Planet Scope 卫星的遥感数据以地表反射率和植被指数作为预测因子预测作物生物量, 并基于预测结果运用模糊 C-means 聚类方法进行精准管理分区, 运用产量数据进行验证, 结果表明总体准确率从 61.20~68.25% 不等^[39]。通过遥感手段实现指标的获取进行 SSMZ 是高精度, 低成本与强时效的有效方法, 以连续多年的 SSMZ 为例, 通过 Google Earth Engine (GEE) 平台下载具有时间序列的影像信息可以缩短预处理时间, 同时可以更好地提取不同时期的共性信息, 其通过批量处理大数据的优势可以为 SSMZ 提供更多的有用信息。

2.2 遥感航空数据

航空系统获取低空地表信息的优势在于: 数据重访频率高、飞行成本低、飞行规划可控、对现场情况快速反应、在难以进行现场数据收集的情况下收集超高分辨率图像潜力、在不与农作物直接接触的情况下, 获取作物生育期冠层反射的电磁波信息以及不受云覆盖因素的影响^[40-41]。基于无人机捕获的作物 NDVI 运用 K-means 聚类算法, 快速、实时地划分管理区的便携系统, 可在 6 秒内实现对包含 938 万像素的图像的划分^[42]。遥感航空数据不仅为 SSMZ 提供了丰厚的数据源, 也大大提高了 SSMZ 的效率与准确性。

2.3 地形数据

高精度地形信息可以从数字高程模型 (Digital

Elevation Model, DEM) 中提取, DEM 的获取途径包括: SRTM-DEM (<http://srtm.csi.cgiar.org/download>) 数据下载, RTK-GPS (Trimble 5800), RTK-GPS Leica (Leica GPS 1200)、合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术, 机载激光扫描 (ALS), 无人机拍摄等多种方式测量。DEM 与土壤养分空间分布、植被长势密不可分^[43-44], 由于 SSMZ 是综合考虑土壤与作物空间变异性的管理方式, 引入 DEM 信息有助于解释产量的空间变异性, 对于 SSMZ 划分精度具有提升作用^[45-46]。

3 精准管理分区方法概述

Takács 等在估算害虫对作物系统的经济影响时发现: 改用精准杂草管理可节省 3 万吨农药的使用, 当 30% 的作物生产采用这项新技术后, 环境负荷减少了 10~35%, 这表明专家知识在进行精密管理中的重要性^[47]。此外, 依据农民多年来的耕作经验进行 SSMZ 也被认为是行之有效的, 这比政府制定的方案更具有针对性^[48-49]。因此, 充分了解农民对土地环境的认知是实现土壤肥力管理的最适切入点。

而这一方法并不适用于所有情况, 农业系统是复杂的社会生态系统, 农民在管理其系统的意识、观念和技能方面可能大相径庭, 身份差异, 决定了农民对管理的看法有所不同^[50]。教育水平低、知识匮乏、追求高利润是 SSMZ 失败的主要原因; 农场作物的种植种类和施肥限定受到国家的宏观调控, 而农民是否采取这种做法与农民对土地的使用安排及生产效益相关, 同时受到农场规模的制约^[51]。因此, SSMZ 需要通过更加客观的途径实现, 如机器学习。当计算机读取信息后, 通过不同的分区原则对研究区进行划分, 同时, 借助先验知识对不满意的结果进行调参或迭代计算。

3.1 监督分类

研究人员采用数字技术使 SSMZ 逐步摆脱手工绘制土壤图的原始方法, 转向计算机领域发展, 这一过程是从监督分类开始的。监督分类是以建立统计识别函数为理论基础、依据典型样本训练方法进行分类的技术, 最初被用于对不同类地物的识别与制图^[52-53], 替代传统的实地调查方法, 大大提高了分类效率。由于监督分类常被用于研究区范围广阔, 地物类型丰富的研究中, 因此, 在田块尺度的 SSMZ 的应用有限。

3.2 非监督分类

3.2.1 K-means 聚类 土壤属性与作物长势密切相关, 但过多的土壤养分信息在进行 SSMZ 时具有冗余性, 因此, 通常将多种土壤属性数据进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 后进行空间插值, 获取连续的表层空间信息后使用 K-means 聚类方法进行管理区划分^[9]。Li 等测量 ECa, 评价其分布的空间变异性和时间稳定性, 并在时空特征的基础上, 进行聚类分析评价海岸带管理的潜力^[19]。K-means 聚类在地物类型识别、地表覆被分析、及土地利用规划和管理方面亦受欢迎^[54]。

3.2.2 ISODATA 聚类 与 K-means 聚类相比, ISODATA 聚类可以更好的根据给定聚类数目进行迭代计算, 使分区数量可控, 但需要额外指定较多的参数。Regmi 等对 LiDAR 和 Landsat ETM 获取的土壤因子进行了迭代主成分分析, 结合 ISODATA 技术对具有 95% 以上协变量空间变异性进行整合和分类, 得到多尺度土壤景观关系图, 并与航空照片、卫星图像和野外观测的土壤地貌图进行比较, 证实了 ISODATA 聚类方法对土壤景观特征空间的适用性^[55]。使用 PCA 方法对多种土壤属性进行综合分析, 利用 ISODATA 聚类方法可以实现高精度的 SSMZ^[56] 及分类研究。随着计算机算法的不断进步, ISODATA 聚类也实现了对不同数据格式的分类, 这为未来 SSMZ 的发展提供了更多的便利。

3.2.3 模糊 C-means 聚类 作为 K-means 聚类的升级, 模糊 C-means 聚类在于可以给定最优聚类数目范围, 由计算机进行迭代处理, 无需人为干预, 在处理大数据时速度快。通过克里金插值法刻画管理区土壤属性的空间分布, 运用模糊 C-means 聚类方法进行分区管理, 有助于实现研究区农作物产量的提升^[57-58]。Kweon 等选取 Eca、土壤有机质和地形因子等指标作为输入量, 采用模糊 C-means 聚类建立了立地生产区的划分程序^[59]。Scudiero 等根据土壤盐分、土壤质地、土壤有机碳含量和容重的变异性, 结合高分辨率 ECa 数据和农田 NDVI 数据, 模拟了约玉米产量空间变异的 53%, 在此基础上, 采用模糊 C-means 聚类方法将田间划分为 5 个管理区, 完成研究区产量的估算^[18]。Betzek 等借助克里金插值法生成不同类别的土壤属性映射, 在模糊 C-means 算法支持下, 应用校正函数消除孤立像素以平滑类间的边界^[60]。模糊 C-means 聚类是 SSMZ 研究中最

常见的划分方法^[61-62], 也是诸多聚类方法中最常见的机器学习方法。

3.2.4 面向对象的多尺度分割技术 图像分类领域正经历着由基于像素划分到面向对象图像分析技术 (Object-Oriented Classification, OOC) 的转变, 随着遥感数据空间分辨率的提高, 基于像素的划分导致的脉冲噪声问题放大, 这一矛盾为 OOC 的出现提供了便利条件 (图 3)^[63]。分别使用 OOC 和 K-means 聚类对研究区 NDVI 进行分区, 特别是在消除边缘效应、将管理区域转换为类等方面, 结果表明: 随着进一步的发展, OOC 可能为划定管理区提供另一种可能更好的方法^[64-65], 经 OOC 划分得到的区块形状科学实用, 这些很难通过其他手段实现^[66]。Liu 等提出了一种利用 OOC 进行 SSMZ 的新方法, 选取常见植被指数和作物物候期的最优组合作为 SSMZ 的输入变量, 利用分段产量监测图来确定最优物候期, 研究表明: SSMZ 尺度上的植被指数与产量之间的相关性高于像素级分类^[38]。基于 OOC 划分的管理区作物生长期 NDVI 变异系数显著降低^[26]。面向对象多尺度分区技术多基于 Definiens 平台开发的 eCognition 运行, 是目前除聚类方法外, 应用最广泛的 SSMZ 划分方法。图 4 为不同方法划分原则及特点对比。

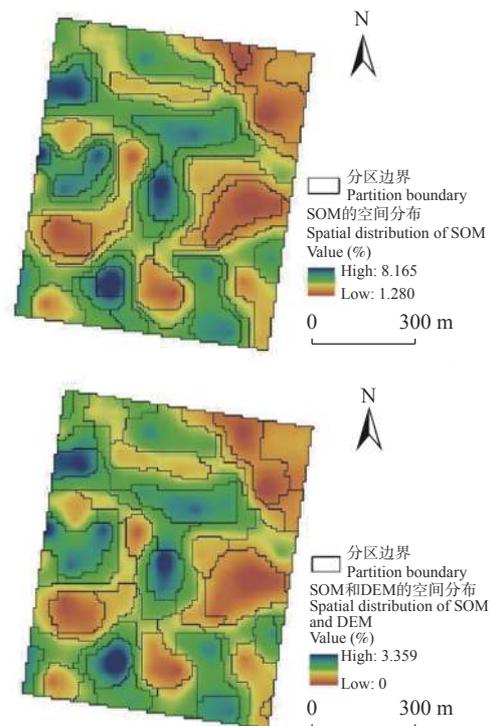


图 3 基于面向对象分割方式的不同输入量的分区情况^[11]
Fig.3 Partitioning of different inputs based on object-oriented segmentation^[11]

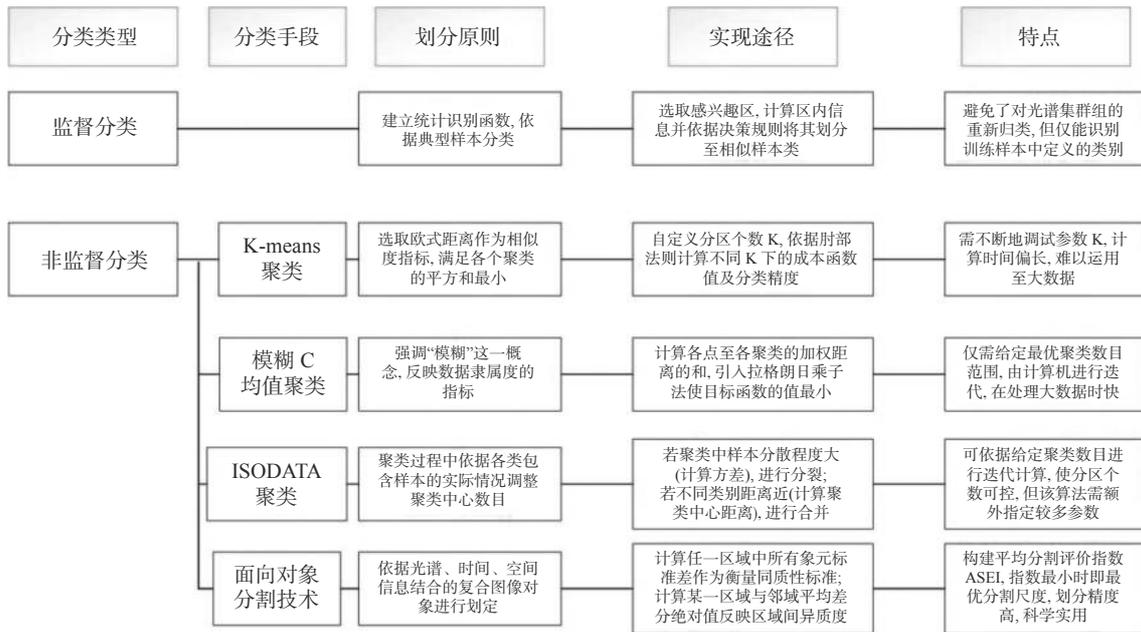


图 4 不同方法划分原则及特点对比
Fig.4 Comparison of the principles and characteristics of different methods

4 分区效果评价方法

SSMZ 是精准农业中必不可少的环节, 分区结果的精度直接影响着变量施肥处方图的准确性。不同分区尺度决定着“分区”边界与“分区”的大小, 依据不同分区方法的划分原则, 依据目视解译与经验法, 在适宜分区数量与分区形状的基础上, 确定研究区的最优分区尺度。生成的分区结果应该具有简单的, 不影响农业生产, 可长期稳定实现变量施肥与收获的特征。在此基础上, 确定最优分区尺度生成处方图以供农业使用。最优分区尺度的确定一般在两个阶段中进行: 其一是在实现分区前确定最佳阈值; 另一种则是在分区完毕后, 对不同分区结果进行评价以择取最优分区方法。检索发现: 第一种方法常用于模糊聚类的分区, 第二种方法可以对多种划分方法进行比较, 实用性更强。依据尺度参数估计方法使用频次, 将分区评价方法进行归纳:

4.1 FPI, NCE 最优集群类

引入模糊聚类分析的统计最小化群内变异, 同时最大限度地利用组间差异产生同质群, 构造聚类函数, 将模糊效果指数 (Fuzziness Performance Index, FPI) 和标准化分类熵 (Modified Partition Entropy, MPE) 作为最佳聚类数的指标, 确保实现高精度 SSMZ^[67]。

4.2 方差减少率

方差指标在 SSMZ 中常用来度量数据的变异程

度, 其反映分区算法解释变量方差所占比例^[5]。随着分区个数的不断增加, 研究区内的方差不断减小, 而方差减少率不断增加^[28,68-70]。

4.3 变异系数

与最优集群类的评价原则相似, 计算不同尺度下区域的均值, 标准差, 面积比例变化及变异系数, 选取区内均值稳定, 标准差发生突变, 面积比例变化趋向稳定, 变异系数发生突变时所对应的尺度即最优尺度^[5,71]。刘焕军等应用 OOC 进行划分, 在确定了形状与紧致度的前提下, 对不同尺度下的平均分割评价指数 (Average Segmentation Evaluation Index, ASEI) 进行计算, 以区域均值与标准差之比作为标准, 评价不同输入量的分区精度, 在分区数目出现明显变化时, ASEI 最大值所对应的尺度即最优尺度^[11,36]。计算不同分区方法的区内与区间的变异系数, 以分区间变异系数大, 区内变异系数小作为评价标准进行比较可确定最优空间尺度^[58]。分区前后土壤及作物参数的变异情况能够最直观地验证精准管理分区的效果, 评价 SSMZ 的划分是否将不同土壤条件、作物生长情况的区域区分开来的目的。

4.4 空间破碎程度评价与空间一致性

将生态学中的景观结构指数引入到 SSMZ 中, 以评价空间破碎化程度。Kappa 系数作为衡量分类精度的指标, 意在度量在相同主体的独立情况, 评价不同尺度窗口过滤后的分类图的空间一致性^[72-73], 当

观察到个体之间存在关联时, Kappa 系数是正的, 空间一致性越相似, Kappa 系数值越接近于 1。

对比上述评价指标可发现: 在 SSMZ 中, 判断分区精度优劣的标准, 即进行分区后同一区域内部同质性高, 不同区域之间异质性强, 区域内部可通

过评价其标准差, 方差变化率, 对象相似性等指标来判断; 区域之间需增大聚类间的分离程度, 使空间破碎化, 降低空间聚类的相关性, 从而增大区域间的异质性。将分区效果评价原理及途径在图 5 中展示:

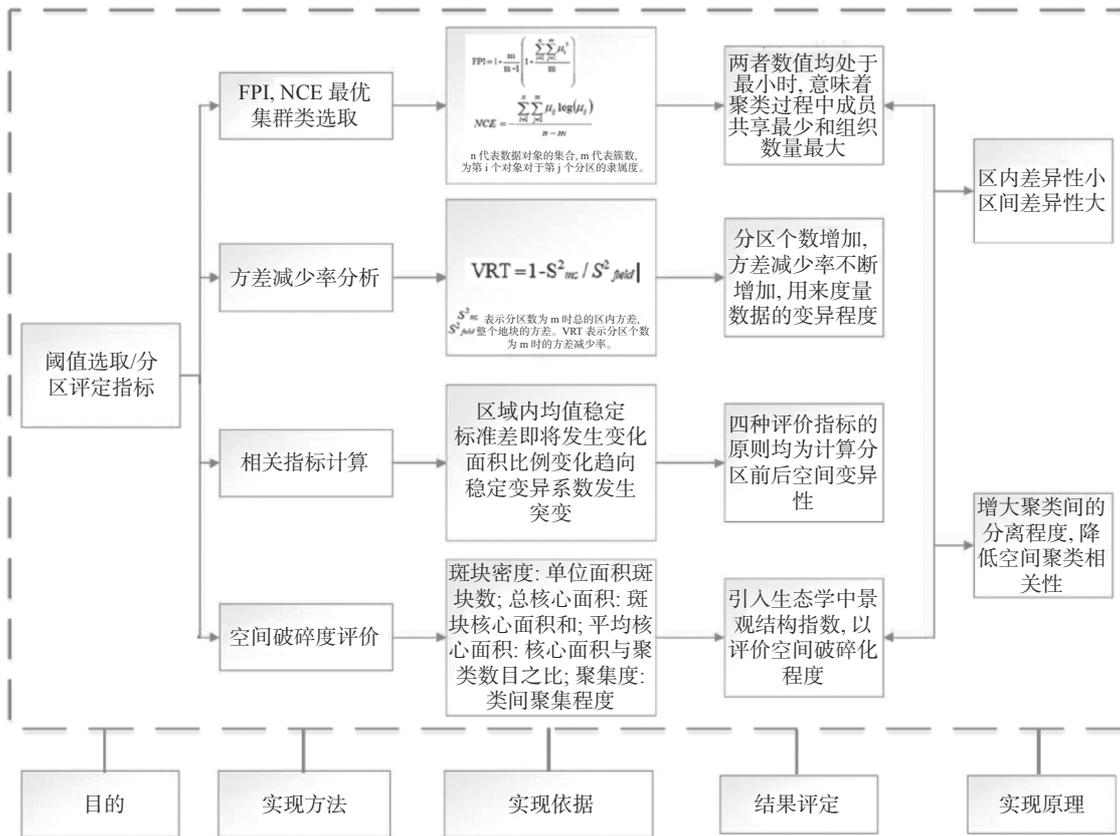


图 5 分区效果评价原理及途径
Fig.5 Principle and approach of partition effect evaluation

5 SSMZ 前景与展望

SSMZ 依托农业需求与科技进步得以迅速发展, 是智慧农业的重要组成部分。从 SSMZ 发展的历程看, 其在国外的时间较长, 内容也相对更加完善, 对自然与生态的考虑也更加全面。通过对现有研究的整合归纳, 未来我国 SSMZ 的研究思路更加清晰: 一方面, 如何结合自然生态系统的内容使 SSMZ 考虑信息更加多元化、合理化与系统化; 另一方面, 如何更好地利用现代技术, 探测更科学的 SSMZ 划分方法。另外, SSMZ 领域在技术不断发展的同时也不能忽视它的合理性和农民的接纳性。基于此, 认为未来 SSMZ 研究应在以下方面加强。

5.1 充分利用多源空间信息

SSMZ 的精度随着社会对粮食产量的需求及农民对划分结果的接纳性不断提高。传统的农田管理精

准度不高, 且依靠采样方式的周期较长, 不适用于现代农业对于发展的要求, 而传感系统和无人机平台的出现不仅解决了时效问题, 同时展示出高密度数据信息的优势, 随着无人机技术的进步及传感器的普及, 未来的信息将向着分辨率更高, 数据类型更为全面, 获取成本更加低廉的方向发展。此外, 产量的变化存在较大的不确定性, 单一年份的作物长势并不能反映自然生态系统对其的影响, 由于累积效应的存在, 考虑其他因子如地形, 温度, 降水等信息是必要的, 水、土、气、生的耦合作用对 SSMZ 的影响不容忽视。为更精准的模拟环境因素对作物产量的影响, 满足 SSMZ 输入变量的实际需求, 多数据融合、动态监测以及利用多种模型模拟空间产量分布成为发展的必然趋势, 基于多源信息的实时动态分区管理也是迫切需要重点研究的课题。

GEE 平台的出现与发展将进一步满足数据同化系统的并行计算要求,使多源空间信息实现融合,为提高 SSMZ 效率与精度提供了可行方案。

5.2 改进现有分区方法

目前 SSMZ 的方法大多是在聚类算法的基础上不断改进,使分类的精度更佳、准确度均有提升。但是基于算法改进进行分区的研究受限,大多数的分区研究在输入量上的创新较大,普遍接受的分区方法仍是模糊聚类,对于创新性分区方法的研究还具有很大的空间。人工智能时代已经到来,SSMZ 领域也应抓住时代机遇,充分合理利用现代技术是 SSMZ 领域发展的必然趋势。传统划分方法具有可行性,但同时也具有一定的局限性。人工智能算法为划分 SSMZ 提供了一系列新的方法,在带来机遇的同时也迎来了挑战。分区算法的优化、多源数据融合过程中的算法及适用性、如何利用算法弥补原有分区方法的不足等都是我们要攻克的难题。

5.3 促进技术与认知的良性互动

现阶段,SSMZ 技术对于农民来说是一种期望值高但比较陌生的农业手段,这是由于研究区的选定通常与政府关联,试验场地从选取到进行分区这一过程缺乏与农民交流的环节,在后期的实践中缺少跟踪调查。因此如何将农民不了解的技术转化为操作性更强、更易理解的田间管理办法也是接下来本领域学者需要讨论的问题。未来的 SSMZ 发展应注重增加农民的参与感,鼓励农民依据施肥处方图进行精准管理。由“互联网+”支持下的智能施肥管理平台的构建有助于实现实时、精确的农田养分及精准施肥便捷化管理。结合 3S 技术、农业遥感与精准农业研发、遥感卫星应用与大数据分析等技术优势,以地块自然资源数据与卫星遥感数据、物联网传感器数据、用户录入数据为基础,技术人员借助智慧平台构建农业信息数据库,实现田间情况实时监控和远程自动控制以及精准、智能化施肥管理。农户、各级政府、民政、统计等不同职能管理部门通过手机 APP 客户端、电脑等设备了解农业生产状况,并借助专家决策系统获得科学合理的施肥指导,进行管理决策和监督管控,实现精准作业。

参考文献:

[1] Khosla R, Fleming K, Delgado J A, et al. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57:

513 - 518.

- [2] Ferguson R. B, Hergert G W, Schepers J S, et al Site specific nitrogen management of irrigated maize: Yield and soil residual nitrate effects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 544 - 553.
- [3] Koch B, Khosla R, Frasier W M, et al. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1572 - 1580.
- [4] 自由路, 金继运, 杨俐苹, 等. 基于GIS的土壤养分分区管理模型研究[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1): 46 - 50.
- [5] 李翔, 潘瑜春, 赵春江, 等. 基于多年产量数据的精准农业管理分区提取与尺度效应评价[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1825 - 1833.
- [6] Dragovic S, Onjia A. Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 89(2): 150 - 158.
- [7] Mulla, David J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(4): 358 - 371.
- [8] 李翔, 潘瑜春, 马景宇, 等. 基于多种土壤养分的精准管理分区方法研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 14 - 20.
- [9] Davatgar N, Neishabouri M R, Sepaskhah A R. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering[J]. *Geoderma*, 2012, 173-174: 111 - 118.
- [10] Buresh R J, Castillo R L, Torre J C D, et al. Site-specific nutrient management for rice in the Philippines: Calculation of field-specific fertilizer requirements by Rice Crop Manager[J]. *Field Crops Research*, 2019, 239: 56 - 70.
- [11] 刘焕军, 鲍依临, 徐梦园, 等. 基于SOM和NDVI的黑土区精准管理分区对比[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 177 - 183.
- [12] 张春华. 基于GIS和地统计学的植烟土壤养分空间变异及管理分区研究[D]. 河南农业大学, 2010.
- [13] Haghverdi A, Leib B G, Washington-Allen R A, et al. Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 117: 154 - 167.
- [14] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 左余宝, 程明芳. 分区平衡施肥技术对氮肥利用率和土壤养分平衡的影响[J]. *土壤肥料*(6): 3-7.
- [15] Aura, Pedrera-Parrilla, Yakov, et al. Concurrent temporal stability of the apparent electrical conductivity and soil water content - ScienceDirect[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 319 - 326.
- [16] Aggelopoulou, Katerina, Gemtos, et al. Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, 90(90): 119 - 130.
- [17] 李艳, 史舟, 吴次芳, 等. 基于多源数据的盐碱地精确农作管理分区研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 84 - 89.
- [18] Scudiero E, Teatini P, Corwin D L, et al. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon

- margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 99: 54 – 64.
- [19] Li Y, Shi Z, Li F, et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2007, 56: 174 – 186.
- [20] Moral F J, Terrón J M., Silva J R M D Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106(2): 335 – 343.
- [21] Williams A, Davis A S, Ewing P M, et al. Precision control of soil nitrogen cycling via soil functional zone management[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 291 – 295.
- [22] Yao R J, Yang J S, Zhang T J, et al. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland[J]. *Geoderma*, 2014, 232: 381 – 393.
- [23] Moshia M E, Khosla R, Longchamps L, et al. Precision manure management across site-specific management zones: Grain yield and economic analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(6): 2146 – 2156.
- [24] Lamb J A, Dowdy R H, Anderson J L, et al. Spatial and temporal stability of corn grain yields[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1997, 10(3): 410.
- [25] Chang D, Zhang J, Zhu L, et al. Delineation of management zones using an active canopy sensor for a tobacco field[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 109: 172 – 178.
- [26] Qiu Z C, Liu H J, Zhang X L, et al. Analysis of spatiotemporal variation of site-specific management zones in a topographic relief area over a period of six years using image segmentation and satellite data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019, 45(6): 746 – 758.
- [27] Shi W Z, Chong Y S, Xiao Y C, et al. Spatial Interpolation of soil texture using compositional kriging and regression kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(9): 1673 – 1683.
- [28] Gavioli A, De Souza E G, Bazzi C L, et al. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 302 – 310.
- [29] 陈世超, 杜太生, 王素芬. 基于模糊c均值聚类法的玉米农田管理分区研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 293 – 300.
- [30] Milne A E, Webster R, Ginsburg D, et al. Spatial multivariate classification of an arable field into compact management zones based on past crop yields[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2012, 80: 17 – 30.
- [31] Cruz S, Univ P, Los Baños, et al. Nutrient-pest interactions under irrigated lowland rice production systems with farmer's fertilizer practice and site-specific nutrient management in South and Southeast Asia[J]. *Philippine Journal of Crop Science*, 2007, 17(1): 13 – 28.
- [32] Whetton R L, Waine T W, Mouazen A M. Evaluating management zone maps for variable rate fungicide application and selective harvest[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 153: 202 – 212.
- [33] 梅安新. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [34] 陈伟. 机采棉田精准管理分区提取的研究[D]. 石河子大学, 2011.
- [35] Kratzer S, Therese Harvey E, Philipson P. The use of ocean color remote sensing in integrated coastal zone management—A case study from Himmerfjärden, Sweden[J]. *Marine Policy*, 2014, 43: 29 – 39.
- [36] 刘焕军, 邱政超, 孟令华, 等. 黑土区田块尺度遥感精准管理分区[J]. *遥感学报*, 2017, 21(3): 470 – 478.
- [37] Zhang Z, La X, LU N, et al. Defining agricultural management zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of drip—irrigated cotton fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 125 – 132.
- [38] Liu H, Whiting M L, Ustin S L, et al. Maximizing the relationship of yield to site-specific management zones with object-oriented segmentation of hyperspectral images[J]. *Precision Agriculture*, 2018, 19(2): 1 – 17.
- [39] Breunig F M, Galvão L S, Dalagnol R, et al. Delineation of management zones in agricultural fields using cover–crop biomass estimates from PlanetScope data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 85: 102004.
- [40] 赵明明. 基于无人机与卫星影像的农田精准管理分区研究[D]. 东北农业大学, 2019.
- [41] Lu B, He Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 128: 73 – 85.
- [42] Santos S G, Melo J C, Constantino R G, et al. A solution for vegetation analysis, separation and geolocation of management zones using aerial images by UAVs[C]. IX Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC). 2019.DOI: 10.1109/SBESC49506.2019.9046079.
- [43] Kumhálová J, Moudrý V. Topographical characteristics for precision agriculture in conditions of the Czech Republic[J]. *Applied Geography*, 2014, 50(2): 90 – 98.
- [44] Kravchenko A. N, Bullock D G Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(92): 75 – 83.
- [45] 陈世超, 杜太生, 王素芬, 等. 基于农田管理分区的制种玉米产量估算与限制因子评价[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 128 – 133.
- [46] María S M, Walter R C, Federico D K, et al. Delineation of site-specific management units for operational applications using the topographic position index in La Pampa, Argentina[J]. *Computers*

- and *Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 158 – 167.
- [47] Takács-György K, Rahoveanu T, Magdalena M, et al. Sustainable new agricultural technology – Economic aspects of precision crop protection[J]. *Procedia Economics & Finance*, 2014, 8(1): 729 – 736.
- [48] Yohannes D F, Ritsema C J, Solomon H, et al. Irrigation water management: Farmers’ practices, perceptions and adaptations at Gumselassa irrigation scheme, North Ethiopia[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 191: 16 – 28.
- [49] Rusinamhodzi L, Dahlin S, Corbeels M. Living within their means: Reallocation of farm resources can help smallholder farmers improve crop yields and soil fertility[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 216(1): 125 – 136.
- [50] Heitor M T, Ardjan J V, et al. Farmers show complex and contrasting perceptions on ecosystem services and their management[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 33: 44 – 58.
- [51] Osmond D L, Hoag D L, Luloff A E, et al. Farmers’ use of nutrient management: lessons from watershed case studies[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(2): 382.
- [52] Martínez-Verduzco G C, Galeana-Pizaña J M, et al. Coupling Community Mapping and supervised classification to discriminate Shade coffee from Natural vegetation[J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 1 – 9.
- [53] Shaharum N S N, Shafri H Z M, Gambo J, et al. Mapping of krau wildlife reserve (KWR) protected area using landsat 8 and supervised classification algorithms[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 10: 24 – 35.
- [54] Xu H, Ma C, Lian J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated k-means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 975 – 986.
- [55] Regmi N R, Rasmussen C. Predictive mapping of soil-landscape relationships in the arid Southwest United States[J]. *Catena*, 2018, 165: 473 – 486.
- [56] 付 强. 基于多源数据的田块尺度精准管理分区研究[D]. 东北农业大学, 2016.
- [57] 张 泽. 基于GIS的土壤氮素分区管理与施肥模型建立研究[D]. 石河子大学, 2015.
- [58] Behera S K, Mathur R K, Shukla A K, et al. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India[J]. *Catena*, 2018, 165: 251 – 259.
- [59] Kweon G. Delineation of site-specific productivity zones using soil properties and topographic attributes with a fuzzy logic system[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 112(4): 261 – 277.
- [60] Betzek N M, Souza E G D, Bazzi C L, et al. Rectification methods for optimization of management zones[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2018, 146(1): 1 – 11.
- [61] 李渊博. 基于GIS的不同时期烟田土壤养分管理分区研究[D]. 河南农业大学, 2014.
- [62] Pedroso M, Taylor J, Tisseyre B, et al. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 70(1): 199 – 208.
- [63] Ouyang Z T, Zhang M Q, Xie X, et al. A comparison of pixel based and object-oriented approaches to VHR imagery for mapping saltmarsh plants[J]. *Ecological Informatics*, 2011, 6(2): 136 – 146.
- [64] 陈春雷, 武 刚. 面向对象的遥感影像最优分割尺度评价[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1): 96 – 102.
- [65] Benz U, Development S. Definiens Imaging GmbH: eCognition: Object Oriented Image. 2001.
- [66] Bernabé S, Plaza A, Reddy M P, et al. A new parallel tool for classification of remotely sensed imagery[J]. *Computers and Geosciences*, 2012, 46(46): 208 – 218.
- [67] Wang X Z, Liu G S, Hu H C, et al. Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2009, 65(2): 168 – 175.
- [68] Ohana L N, Ben G A, Peeters A, et al. A comparison between spatial clustering models for determining N-fertilization management zones in orchards[J]. *Precision Agriculture*, 2021, 22: 99 – 123.
- [69] Tripathi R, Nayak A K, Shahid M, et al. Delineation of soilmanagement zones for a rice cultivated area in eastern India usingfuzzy clustering[J]. *Catena*, 2015, 133: 128 – 136.
- [70] Frogbrook Z L, Oliver M A. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data[J]. *Soil Use & Management*, 2010, 23(1): 40 – 51.
- [71] 安光辉, 马 蓉, 陈 伟, 等. 基于K-均值聚类的绿洲农田管理分区提取的研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(06): 757 – 761.
- [72] 李 翔, 潘瑜春, 赵春江, 等. 基于空间连续性聚类算法的精准农业管理分区研究[J]. *农业工程学报*, 2005, (08): 78 – 82.
- [73] Guastaferrò F, Castrignanò A, Benedetto D D, et al. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones[J]. *Precision Agriculture*, 2010, 11(6): 600 – 620.

Review on Site-Specific Management Zone for Zonal Fertilization Delineation in Last 20 Years

BAO Yi-lin¹, MENG Xiang-tian¹, LIU Huan-jun^{1,2*}, YIN Yue¹,
MA Yu-yang¹, QIU Zheng-chao³, ZHAO Ming-ming⁴

(1. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. Agricultural Technology Center, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract: Site Specific Management Zones (SSMZ) is a key link in precision agriculture to realize the timing, fixed point, quantitative, and fixed formula input of water and fertilizers and other agricultural production materials. SSMZ has been rapidly developed and applied in precision agriculture. It is of great significance in reducing agricultural input, improving economic efficiency and reducing agricultural non-point source pollution. A comprehensive understanding the research status and existing problems of SSMZ will help to better grasp the development trend of SSMZ and its application in the further research. This paper sorted out the application principles, data types, advantages and limitations of different input quantities in SSMZ at home and abroad, summarized the existing partitioning methods, and sorted the SSMZ evaluation methods commonly used. Different evaluation methods were analyzed, summarized and prospected. The input of SSMZ changed from mapping the spatial attributes of soil based on spatial interpolation to the use of remote sensing technology to obtain relevant information such as soil and vegetation. With the arrival of the era of big data, the comprehensive consideration of historical soil physical and chemical properties, effects of soil-forming elements, crop spatiotemporal dynamics, and hydrogeological topography and landforms helped to improve the accuracy of SSMZ. The researches based on the dense data obtained by near-end sensors and drones were increasing, and the accuracy of field-scale spatial information was high and its continuity was enhanced. Traditional unsupervised classification algorithms were gradually replaced by object-oriented segmentation methods, and the partition results were more helpful to guide field management measures. Evaluation information used for SSMZ was main by the soil properties closely related to crop growth or the crop growth parameters. Attention to SSMZ had been gradually increasing at home and abroad, and various SSMZ research results had important practical significance for realizing green agriculture and maintaining ecological security.

Key words: SSMZ; Input; Multi-source data; Segmentation method; Evaluation methodology

[责任编辑: 孙福军]