

粒子群算法在农业水文学中的应用进展

邓婵, 李纯, 李梦琪, 方梦林 (湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430000)

摘要 优化问题一直是农业水文学研究的重要问题之一, 而粒子群算法作为新型智能算法具有很好的寻优能力。介绍了粒子群算法的流程和步骤, 以及各种改进后的粒子群算法, 分析了粒子群算法在农业水资源优化配置、农田节水灌溉措施、农作物种植优化等农业水文学几个方面的应用现状。结果表明, 粒子群算法在农业水文学中的应用范围有限; 现有应用研究重视经济效益最大化, 忽视社会效益; 研究呈现碎片化的现象, 未形成完整的学科理论体系; 改进后的粒子群算法具有更好的寻优能力。指出粒子群算法与其他优化算法和技术结合将会为该算法在农业水文学中的发展开辟新的方向和道路, 为农业水文学中科学问题的解决得出更好的优化结果。

关键词 农业水文学; 粒子群算法; 优化问题; 农业发展

中图分类号 S271 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)08-0016-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.08.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Application of Particle Swarm Optimization in Agricultural Hydrology

DENG Chan, LI Chun, LI Meng-qi et al (College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan, Hubei 430000)

Abstract The optimization problem has always been one of the important problems in agricultural hydrology research, and particle swarm optimization (PSO) as a new intelligent algorithm has a good optimization ability. This paper introduced the process and steps of particle swarm optimization (PSO), as well as various improved PSO, analyzed the application status of PSO in agricultural hydrology such as optimal allocation of agricultural water resources, water saving irrigation measures for farmland and optimization of crop planting. The results showed that the application of particle swarm optimization in agricultural hydrology was limited. The existing applied research focused on the maximization of economic benefits and ignored the social ecological benefits. The research was fragmented and did not form a complete discipline theory system. The improved particle swarm optimization algorithm had better searching ability. The paper pointed out that the combination of particle swarm optimization (PSO) with other optimization algorithms and techniques will open up a new direction and path for the development of this algorithm in agricultural hydrology and obtain better optimization results for solving scientific problems in agricultural hydrology.

Key words Agricultural hydrology; Particle swarm optimization; Optimization problem; Agricultural development

目前, 国内农业发展存在用水效率不高、农田灌溉用水浪费及地区性缺水等问题, 而农业水文学兼具农业科学和水文学的双重属性, 未来农业的发展要朝着高效、节能、可持续方向迈进, 这就需要对农业水资源的优化问题进行思考, 并提出可行的应对措施。

农业水文学是研究农业生态系统中农业措施、农业工程方面各种水文现象的发生发展规律及其内在联系的一门学科。农业水文学研究领域主要包括农业水资源、作物需水量、农田覆盖节水保墒技术、节水灌溉技术和节水管理系统化等问题^[1]。农业水文学中一类重要的问题是优化问题, 如农业水资源优化配置、农田节水灌溉措施、农作物种植优化、作物需水量预测等。

传统的优化方法如动态规划(dynamic programming, DP), 随着状态空间和决策空间的增加容易出现“维数灾”问题, 而逐步优化方法(progressive optimality algorithm, POA)虽然能在一定程度上克服“维数灾”的困境, 但在求解的收敛速度上不如人意。即使是应用广泛的遗传算法(genetic algorithm, GA)在求解优化问题时, 也会出现局部寻优能力差、容易陷入早熟的问题, 且算法流程比较复杂^[2]。因此, 许多源于自然界的智能演化算法应运而生, 如粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、蚁群算法、鱼群算法等, 而 PSO 是这些算法中的佼佼者。部分学者用 PSO 替换 GA 进行计

算, 结果表明 PSO 比 GA 能更快地找到优质的设计参数。PSO 是一种基于群集智能的演化计算技术, 由于算法具有依赖的参数少、收敛速度快、编程易实现等特点, 而在农业水资源优化配置^[3]、农田节水灌溉措施^[4]、农作物种植优化^[5]、作物需水量预测^[6]等领域得到广泛的应用。

1 粒子群算法

1.1 PSO 介绍 粒子群算法, 也称作粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO), 是 Eberhart 等^[7]在 1995 年提出的新型仿生算法。该算法通过模拟鸟群觅食行为在求解空间进行目标函数的最优解的过程。在粒子群算法中, 每个优化问题的可能解被假定为 D 维搜索空间中的一个多边形的顶点, 称其为“粒子”^[8]。所有粒子具有目标函数确定的适应度值, 粒子按照确定飞行方向和飞行距离的速度, 跟随搜索空间中当前的最佳粒子进行搜索^[9]。粒子经初始化后, 确定一个随机解, 然后通过不断更新个体极值和全局极值的迭代方式来寻优^[10]。

假设在 D 维搜索空间中, 群落中存在 N 个粒子, 其中第 i 个粒子被表示为 D 维向量, 记为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, N$; 第 i 个粒子“飞行”速度也是 D 维的向量, 记为 $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, N$; 第 i 个粒子到目前为止搜寻到的最优位置则称其为个体极值, 记作 $P_{best} = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$, $i = 1, 2, \dots, N$; 到目前为止整个粒子群搜寻到的最优位置称其为全局极值, 记为 $G_{best} = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})$ 。当找寻到个体极值和全局极值时, 粒子通过以下公式更新自身的速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = \omega \times v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

其中, k , 程序迭代次数; w , 惯性权重; c_1 和 c_2 是学习因子, 通常取值 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的均匀随机数; p_{id}^k , 当前个体搜索到的最优值; p_{gd}^k , 整个种群搜索到的最优值; v_{id}^k , 粒子的运动速度; $v_{id}^k \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, $v_{\max}$ 是常数, 由用户设定来限制粒子的速度; x_{id}^k 是粒子的个体参数, 即决策变量值。

1.2 PSO 标准算法 PSO 自 1995 年提出以来, 随着应用领域和方向的深入发展, 算法本身也暴露了一些缺点, 因而也衍生出算法的多个改进版本, 或者与其他算法混合以达到更好的优化效果, 如双目标免疫粒子群算法^[11]、混沌变异粒子群算法^[12]、自适应变异粒子群算法^[13]、遗传算法和粒子群算法^[14]等, 但 PSO 流程变化不大, 基本步骤: 步骤 1, 粒子初始化, 包括随机速度和位置。步骤 2, 根据目标函数分别计算群体中各个粒子的适应度值。步骤 3, 根据粒子的适应度值来确定单位历史最优个体 P_{best} 、群体历史最优个体 g_{best} 。步骤 4, 根据公式 (1) 及公式 (2) 对粒子的速度与位置进行更新。步骤 5, 对所有粒子, 将其当前的函数值与它以前找到的最好位置进行比较, 如果当前位置较好, 则将个体最优位置 P_{best} 设置为这个粒子的位置, 然后再对群体的全局极值 g_{best} 更新; 步骤 6, 判断给定的终止条件是否满足。若满足终止条件, 停止搜索, 输出需要的结果; 否则, 返回步骤 4 继续搜索。

1.3 PSO 的改进 PSO 虽然具有收敛速度快、鲁棒性好、优化效果好、编程易实现等优点, 但随着算法的纵深发展, 也逐渐暴露出易陷入局部最优解、算法搜索后期收敛速度变慢、参数选择的随机性等缺点, 针对这些缺点一些学者在此基础上作出了一些改进。

1.3.1 惯性权重粒子群算法的自适应改进。在基本粒子群算法中, 当惯性因子 ω 过小时, 可以提高算法的局部搜索能力, 但也可能导致收敛速度慢; 当惯性因子 ω 过大时, 有利于提高算法的全局搜索能力, 但局部搜索能力较弱, 最终可能无法达到收敛效果。针对惯性因子 ω 的特点, 选择合适的值对于算法优化结果至关重要。

钱敏慧等^[15]在多机系统低频减载整定算法的基础上结合自适应惯性权重混沌粒子群算法提出一种混合算法。牛仲新等^[16]调整粒子群算法的惯性权重参数得到改进的粒子群算法, 该算法具有更好的寻优能力。徐浩天等^[17]提出的正态分布衰减惯性权重粒子群优化 (NDPSO) 使得算法具有更好的搜索能力。毛焕宇等^[18]、丁知平等^[19]提出自适应惯性权重的粒子群算法是通过粒子间距的隶属度函数来动态调整粒子的惯性权重。黄洋等^[20]提出了一种基于倒 S 型函数的自适应惯性权重粒子群算法 (SAPSO), 算法的寻优能力好。全秋娟等^[21]根据粒子的适应度值动态调整算法的惯性权重和学习因子的取值, 得到一种新的改进粒子群算法。李军民等^[22]提出一种基于不同粒子不同维的动态自适应惯性权重粒子群算法 (AWPSO)。AWPSO 与 PSO 的算法流程基本未变, 只不过在步骤 4 计算粒子的速度和位置更新时, 前面加上了公式 (3)、(4) 计算惯性权重。计算公式:

$$z_{ij} = (c_1 r_1 (p_{\text{best}ij} - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (p_{\text{best}j} - x_{ij}^k)) / v_{ij}^k \quad (3)$$

$$\omega_{ij}^k = (\omega_{\max} - ((\omega_{\max} - \omega_{\min}) / it_{\max}) * k) * (1 + e^{-kk * z_{ij}}) \quad (4)$$

其中, $it_{\max}$ 表示最大迭代次数; $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别代表最大和最小惯性权重; kk 为固定常值, 值越大惯性权重值增加就越快。

1.3.2 带有收缩因子的粒子群算法进化方程。收缩因子粒子群算法 (CFPSO) 在粒子群算法的基础上引入收缩因子, 虽然 CFPSO 具有较快的收敛速度, 但也存在易陷入局部最优的困境。纪雪玲等^[23]在 CFPSO 中引入位置因子和速度因子, 提出了一种克服局部最优的改进收缩因子 PSO (APPSO) 算法。Clerc 等^[24]将收缩因子引入粒子群算法, 改进算法的速度更新方式, 具体改进公式:

$$v_{id}^k = m (v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k)) \quad (5)$$

$$m = 2 / (2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}) \quad (6)$$

其中, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, $\varphi > 4$ 。一般情况下, φ 取 4.1。收缩因子的引入可以提高粒子群算法的收敛速度和精度。

APPSO 在 CFPSO 的基础上引入位置因子 γ ($\gamma \geq 0$), 测试粒子的当前位置与全局最优粒子的距离 d ($d = |X - G|_2$), 速度因子 ε ($\varepsilon \geq 0$), 判断粒子的飞行速度, 一旦粒子非常接近 P_g ($d > \gamma$), 且它的飞行速度小于设定的速度因子 ε ($|v| < \varepsilon$), 认为该粒子可能出现停滞现象, 则需要对粒子进行位置初始化, 增强粒子的运动能力, 摆脱算法陷入局部极值的困境。

APPSO 与 PSO 算法步骤基本相同, 只不过在 PSO 步骤上适当调整, APPSO 步骤 4 根据公式 (1) 更新粒子速度, 接着求出 d , 将 d 与设定的位置因子 γ 比较, 将更新后的速度与设定的速度因子 ε 比较, 如果 $d < \gamma$, 且更新后的速度小于速度因子 ε , 则在解空间中重新初始化该粒子, 否则直接根据公式 (2) 更新粒子群的位置^[23]。

1.3.3 粒子群算法的其他改进算法。针对粒子群算法在优化过程中存在后期收敛速度较慢、易陷入局部最优解的问题, 除上述 2 种主要改进方法外, 一些学者也提出了其他的改进算法。齐欣等^[25]提出了一种将狮群算法的分组思想融入简化粒子群算法中的改进的群智能优化算法——狮群简化粒子群算法 (LSA-SPSO)。牛在森等^[26]针对现有的推荐算法面对托攻击时鲁棒性差的特点, 提出了一种融合层次聚类和粒子群优化的鲁棒推荐算法。朱德刚等^[27]提出了一种基于反向学习和高斯扰动的粒子群优化算法来解决该算法易陷入局部最优解的问题。孙骞等^[28]针对粒子群算法在解决高维优化问题时易早熟收敛且存在大量无效迭代的问题, 提出了一种基于熵模型的粒子群优化算法 (EPSO)。杜振鑫等^[29]提出一种改进的个性化变异免疫粒子算法群 (PMIP-SO), 可以加快算法的收敛速度, 避免算法陷入局部最优解。胡锦帆等^[30]提出了一种基于单纯形搜索 (nelder-mead simplex search, NM)^[31]和粒子群优化的混合算法 (NM-PSO) 来平衡局部搜索和全局探索之间的矛盾。

2 PSO 在农业水文学中的应用

粒子群算法在科学问题和工程领域都有广泛的应用, 与其相比, 粒子群算法在农业水文学中的应用却很局限, 重点主要集中在农业水资源优化配置、农田节水灌溉措施、农作

物种植优化、作物需水量预测等方面。

2.1 农业水资源优化配置 粒子群算法在农业水资源的优化配置是农业水文学中比较典型的优化问题,重点选取以农业生产活动为主的灌区和县域为研究区域,通过查阅文献用归纳总结法整理出粒子群算法在农业水资源的应用现状,以期对其他具有相似发展条件的农村地区农业水资源优化配置提供借鉴。

从整体来看,在灌区未充分灌溉或者农业灌溉用水量总量约束的条件下,灌区农业生产为追求经济效益最大化,基于粒子群优化算法建立了农业水资源的优化配置模型,模型主要分为2个层次:其一是单一作物全生育期灌溉水量的优化配置;其二是多种作物间灌溉水量的优化配置。张倩^[3]和刘博等^[32]在模型基础上比较了不同降水频率或不同缺水时段农业水资源的优化配置效果,结果表明有时段供水约束下的优化配水结果更利于灌区农业生产发展。

在作物应用领域,农业水资源优化配置的实施行为就是将农业水资源节约高效合理地分配给农作物,上至不同作物间水资源的优化配置,下至单一作物全生育期水资源的优化配置,进而影响作物种植结构和种植面积,以实现更大的经济效益。邹琳等^[11]研究小麦全生育期水资源的最优分配,刘博等^[32]研究早、中、晚3种类型的水稻全生育期水资源的优化配置。陈述等^[33]研究早、中、晚水稻和冬小麦水资源的优化分配,马建琴等^[34]和陈晓楠等^[35]研究小麦、玉米、棉花3种作物间水资源最优分配,张倩等^[36]研究小麦、玉米、棉花、果树4种作物间水资源最优配置,王守光等^[37]研究水稻、玉米、杂粮、瓜蔬等8种作物水资源的优化配置。刘玉邦等^[38]研究冬小麦和夏玉米水资源的优化分配。从目前研究结果看,邹琳等^[11]在非充分灌溉的条件下,建议把冬小麦的灌溉水量控制在210 mm。陈晓楠等^[35]通过计算得出,小麦在返青、拔节、抽穗—成熟这3个生育期的分配水量为0,玉米在后3个生育阶段应分配较少的水量,棉花在“开花—结铃”生育阶段,降水充足,基本不用配水。

从方法模型来看,农业水资源优化配置模型,具有变量多、结构复杂等特点,模型求解涉及多目标、多维度的优化问题。粒子群算法作为一种新型智能算法具有算法流程简单、编程易实现、求解优化效果好等优点,在农业水资源优化配置中具有广泛的应用。粒子群优化算法在农业水资源优化配置中的应用多是基于改进后的算法或者与其他算法组合的混合算法,包括在基本粒子群算法基础上同时进行线性递减惯性权值操作^[3,36],免疫粒子群算法即在标准粒子群算法中加入拥挤距离来评价粒子,然后对粒子进行交叉变异操作^[11,34,38],DP-PSO算法即动态规划和粒子群算法组合算法^[32],粒子群人工蜂群算法即粒子群-人工蜂群混合算法^[33],差分粒子群算法(PSO-DV)^[37]。这些算法在原有基础上优化效果更好,提高了算法的收敛速度和精度。

从应用成果而言,张倩等^[3,36]、邹琳等^[11]、刘博等^[32]、陈述等^[33]、陈晓楠等^[35]结合研究区实际需求,应用粒子群优化算法建立了灌溉水量最优、作物经济效益最好的优化配水模

型,结果表明,各种优化模型效果好,提升了区域农业水资源的优化配置水平。

2.2 农田节水灌溉措施 我国农业用水需求量大,随着水资源浪费与污染现象逐渐加重,我国面临水资源日益严峻的局面,而且部分地区农业用水存在季节性或者区域性的短缺,这些因素都影响农业生产的正常发展。而农田节水灌溉措施是实现作物节约高效利用农业水资源、缓解我国农业用水短缺局面的重要举措。

从灌溉技术层面来看,重点关注的农田节水灌溉技术包括渠系灌溉系统的优化配水设计、各种灌溉系统的优化设计(管网、控制系统、排水),结合粒子群优化算法的优势,各种灌溉系统的优化配水模型在节水农业发展利用中发挥了显著作用。在渠系灌溉系统优化配水方面,渠系优化配置模型发生了从“单目标”函数到“多目标”函数的转变;渠系流量配水方式经历了从“等流量,变历时”到“变流量,变历时”“组间续灌,组内轮灌”到“组间轮灌,组内续灌”转变过程。为实现各渠道流量渗漏损失最小的目标,褚宏业等^[14]、刘照等^[39-40]、王庆杰等^[41]、吴复昌^[42]都建立了基于粒子群优化算法的渠系优化配水模型,其中,褚宏业等^[14]、刘照等^[39]比较粒子群算法与遗传算法在渠系流量配置的应用效果,结果表明粒子群算法更具优势。刘照等^[39]针对下级渠系流量不等时的情况,采用在各出水口按“变流量,变等时”的配水方式。王庆杰等^[40]将“组间续灌,组内轮灌”的配水方式变更为“组间轮灌,组内续灌”,都取得了较好的配水效果。在灌溉系统的优化设计方面,粒子群算法在灌溉系统的优化设计主要应用在树状灌溉管网设计^[43-44]、灌溉控制系统设计^[45]、农田多目标控水排水^[46]、灌区水资源调度管理系统优化^[47]等领域。农业灌溉系统设计是一个复杂、多领域、跨学科的综合系统,各种灌溉系统的优化设计最终目标就是为了更好地服务农业,既解决我国在发展农业中面临的水资源短缺的困境,也是促进农业发展朝着精细化、高端化、节能高效化方向迈进。

从灌溉制度层面来看,灌溉制度是根据作物需水特性及当地气候、土壤、农业技术及灌水等因素制定的灌水方案,它是灌区制定规划及管理工作的的重要依据,合理的灌溉制度可以有效缓解农业水资源日趋紧张的局面。各种作物的生长习性以及需水特性不同,也就形成了不同的作物灌溉制度,包括水稻灌溉制度^[48]、小麦灌溉制度^[49]、玉米灌溉制度^[50]、番茄灌溉制度^[51]等以及其他灌溉制度。李欣欣等^[48]选取水稻分蘖及灌浆2个重要生育阶段,比较4种不同灌溉制度构建了基于粒子群算法的投影寻踪模型,结果表明,水稻在分蘖中期和乳熟前期土壤水分在80%~90%,分蘖末期和乳熟后期土壤水分在70%~80%,此种灌溉制度更有利于水稻增产。周建学^[51]确定在膜下交替滴灌条件下番茄的灌溉制度是现蕾期灌水2次,灌水定额为112.5 m³/hm²;开花期灌水2次,灌水定额为150 m³/hm²;挂果期灌水4次,灌水定额为300 m³/hm²;采摘期灌水4次,灌水定额为225 m³/hm²。粒子群算法在优化作物灌溉制度方面比遗传算法、动态规划算法

具有更快的运算速度及更好的优化结果。

2.3 农作物种植优化 农作物是农业发展的基础,作物生长与水息息相关,农作物种植优化在一定程度上影响农业水资源的优化配置效果。为了达到经济高效利用农业水资源的目,从农业种植角度而言需要优化农业种植技术和农业种植结构,农业种植结构是农业内部的结构调整,即以耗水量小的作物替代耗水量大的作物,并对不同作物之间进行优化组合。这是在种植业内部挖掘节水潜力,既可以在节省农业开支的前提下实现节水,也是促进农业水资源约束地区发展节水农业的最佳选择。

在农作物种植结构优化上,农作物种类主要是粮、经、饲这三大类,各大类下又有多种不同的作物种类,我国农业种植的要求是在保障粮食安全的前提下大力发展经济作物,兼顾饲料作物的种植。李六杏等^[52]在2017年以安徽省为例,优化结果为长江流域水稻种植面积保证率是80.5%,淮河流域小麦种植面积保证率是68%。郝小宇^[53]以榆林市为研究对象,优化结果是小麦种植比例基本不变;玉米和大豆的种植比例有所下降;而薯类种植比例呈上升趋势;油料种植比例缩减较大;蔬菜种植比例大幅度增长;其他类型的作物种植比例呈下降趋势。王玉宝^[54]以黑河流域为例,优化结果为粮经饲种植面积比例由2006年实际的55:41:4调整到49:47:4;由规划2020年的51:44:5调整到44:51:5;由规划2030年的51:44:5调整到43:51:6。王雷明^[55]以河套灌区为例,优化结果是小麦、玉米、油料种植面积比例分别降低到15.36%、14.97%、13.03%;杂粮、向日葵、瓜类、甜菜种植面积分别增长到9.58%、13.48%、21.91%、8.51%。王燕云等^[56]以塔里木河流域为研究对象,结果表明应减少棉花、枣等经济作物和小麦、杂粮等粮食作物的种植面积比例,增加甜菜、苹果、大豆、稻谷、果用瓜等作物的种植面积比例。徐磊^[57]以黑龙江省建三江管理局下辖的15个农场为例,优化结果为与现状年2017年种植面积比较,水稻在规划年2020年和2025年种植面积下降至87.38%、84.67%;大豆在规划年2020年和2025年种植面积是6.26%、8.97%;玉米在规划年2020年和2025年种植面积是5.6%、4.25%。通过研究实例证明,以上农作物种植结构的调整不仅节约利用农业水资源,而且研究区域的整体经济实力都有所增长。

在农作物种植技术优化上,作物种植技术是提高农作物产品产量和质量的手段,优化作物种植技术可以从更经济高效的层面上来提高作物产量和实现更高的经济效益。从农业水文学的角度来分析作物种植技术,离不开与作物生长息息相关的灌溉制度、农业水资源优化配置、作物需水量优化等方面的技术支持。从作物种类来看,春小麦^[49,58]、玉米^[50]、番茄^[51]、春玉米^[58]、马铃薯^[58]、水稻^[59]、草莓^[60]这些作物种类不同,会有不同的生长习性,因而适应不同的灌溉制度。从方法模型来看,在粒子群算法的基础上,提出改进后的粒子群算法^[50-51,59]以及与其他算法组合的混合算法,包括基于自然选择的混合粒子群算法(SELPSO)^[49]、基于杂交的混合粒子群算法(BreedPSO)^[58]、粒子群优化BP算法^[60]、

PID神经网络-粒子群算法^[61]。这些不同优化算法最终目的就是为了优化种植技术水平,更好服务农业种植。从种植技术来看,包括灌溉制度设计^[49-51]、农业水资源优化配置^[58-59]、作物需水量预测^[60-61],这些种植技术都在一定程度上为农业种植创造了一个更好的生长环境,也达到了作物增产增收的目的。

2.4 作物需水量预测 作物需水量是地区制定水利规划和排灌工程规划、管理以及农田排灌实施方案的基本准则和行动指南,而且为了高效节约利用灌溉水资源,对于作物需水量的精准预测十分必要。总之,预测作物需水量将会在农业生产实践中发挥重要的作用。在目前的农业生产实践中,对于作物需水量的计算方法主要是两大类:一是通过田间灌溉试验直接测定;二是通过经验公式计算确定,主要包括测量法(坑测法、田测法、波文比法)、直接计算法(K值法、 α 值法、多因素法)、参考作物法(作物系数法、模型法)。

粒子群算法在作物需水量预测中多是与其他算法组合成模型算法,相较于其他智能算法,粒子群算法具有算法简单、收敛速度快和精度高的优点,因而得到广泛使用。商志根等^[6]以美国田纳西州大学高原实验室所测数据为例,建立基于粒子群算法(PSO)优化最小二乘支持向量机(LS-SVM)的预测模型来提高作物需水量预测精度。刘玉甫等^[62]以新疆喀什地区为例,提出粒子群算法耦合支持向量机算法模型(PSO-SVM)来解决作物生育期ETO预测的问题。孙艳等^[63]提出基于自适应变异(AV)算法改进PSO-SVR多元变量农业用水预测模型以提高农业用水预测精度。胡冰^[64]提出基于粒子群优化算法的BP神经网络预测模型(PSO-BP)对沈阳市浑蒲灌区作物需水量进行预测。刘天凤^[65]针对小数据模型,提出改进的极限学习机算法(PSO-SWELM)预测作物蒸腾量。研究实例证明,基于粒子群算法的组合模型法在作物需水量预测中的预测精度高,该算法既改进了粒子群算法的性能,也提高了其在农业需水预测中的算法精度。

3 应用中存在的问题和展望

(1)粒子群算法在农业水文学中的应用范围有限,主要集中在上述介绍的几类。农业水文学是一个广泛的概念,不论是学科本身还是指导农业实践来看,现有的应用研究都是不够的,应该不断开拓粒子群算法在农业水文学中的应用广度和深度,聚焦时代发展热点,促进农业水文学的纵深立体化发展。

(2)目前应用研究多是以经济利益最大化为目标,忽视社会生态效益。农业发展追求经济效益无可厚非,但经济与社会生态本是一体,过度厚此薄彼,难免失衡。粒子群算法作为一种新型智能算法,有能力在解决农业水文学的优化问题时平衡协调好三者之间的关系。

(3)现有应用研究呈现碎片化的现象,未形成完整的学科理论体系。现有的应用都是针对特定目标建立的优化模型,不管从粒子群算法本身还是其在农业水文学中的应用,基础理论体系都很缺乏,未来都需要加强基础理论研究。

(4)就粒子群算法而言,改进后的模型算法虽然比其本

身优化效果好,但各种改进后算法的优化效果孰优孰劣仍缺乏定论,且各算法种类繁多,缺少一个对于优化问题通用有效的改进算法。未来对于粒子群算法而言,除加强基础理论研究外,需要研究如何选择和设计参数,使其减少对具体问题的依赖,将会大大促进粒子群算法的发展和应用。而且也需要补充和扩展粒子群算法与其他算法或技术结合,将其应用在并行计算,以期达到更好的优化效果。

4 结语

该研究主要讨论了粒子群算法在农业水文学中的应用进展,也针对粒子群算法的缺点提出了一些改进办法,研究表明改进的粒子群算法在农业水文学中的寻优能力好,收敛效果也更强。粒子群算法作为一种新型智能算法与农业水文学结合,为农业水文学的发展开辟了一条全新的道路,随着对农业水文学研究问题的继续深入和粒子群算法的改进与发展,两者结合将会发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 吴凯.农业水文学[J].地理译报,1991(3):65.
- [2] 董前进,曹广品,王先甲,等.粒子群优化算法在水文学中的应用进展[J].中国工程科学,2010,12(1):81-85.
- [3] 张倩.基于粒子群算法的大荔县农业水资源优化配置研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [4] 张泽的,刘东,张皓然,等.基于 PSO-AHP 与粗集理论组合赋权的灌溉用水效率评价[J].节水灌溉,2018(10):59-63,67.
- [5] 张志政,周威.基于 PSO-BP 神经网络的参考作物蒸腾量预测[J].节水灌溉,2014(11):87-90,95.
- [6] 商志根,段小汇.基于 PSO 与 LS-SVM 的作物需水量预测[J].计算机与现代化,2018(10):44-47.
- [7] EBERHART R C,SHI Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]//Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2001:81-86.
- [8] SHI Y,LIU H C,GAO L, et al. Cellular particle swarm optimization[J]. Information sciences, 2011, 181(20):4460-4493.
- [9] DONG Y, TANG J F, XU B D, et al. An application of swarm optimization to nonlinear programming[J]. Computers & mathematics with applications, 2005, 49(11/12):1655-1668.
- [10] ZHANG Y, GONG D W, DING Z H. A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch[J]. Information sciences, 2012, 192:213-227.
- [11] 邹琳,蔡欣,郝矿荣.基于双目标免疫粒子群算法的水资源优化配置[J].计算机仿真,2018,35(12):296-301.
- [12] 韩韶颀.混沌变异粒子群算法在水库供水调度规则制定中的应用[J].中国水能及电气化,2016(7):49-53.
- [13] 李建美,高兴宝.基于自适应变异的混沌粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2016,52(10):44-49.
- [14] 褚宏业,王莹,文俊,等.遗传算法和粒子群算法求解解系多目标优化模型[J].中国农村水利水电,2015(4):9-11,17.
- [15] 钱敏慧,居蓉蓉,姜达军,等.基于自适应惯性权重混沌粒子群算法的多机系统低频减载整定算法[J].电气自动化,2020,42(2):44-48.
- [16] 牛仲新,胡敏.一种动态调整惯性权值的粒子群算法[J].工业控制计算机,2020,33(3):28-30.
- [17] 徐浩天,李伟东,孙小晴,等.基于正态分布衰减惯性权重的粒子群优化算法[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(2):208-213.
- [18] 毛焕宇,王文东.融合隶属度函数的自适应惯性权重模式的粒子群优化算法[J].计算机应用与软件,2020,37(1):277-283.
- [19] 丁知平,刘超,牛培峰.具有自适应行为的粒子群算法研究[J].统计与决策,2019,35(2):88-90.
- [20] 黄洋,鲁海燕,许凯波,等.基于 S 型函数的自适应粒子群优化算法[J].计算机科学,2019,46(1):245-250.
- [21] 全秋娟,赵岂,李萌.基于自适应动态改变的粒子群优化算法[J].微电子学与计算机,2019,36(2):6-10,15.
- [22] 李军民,王洪涛.一种改进惯性权重策略的粒子群优化算法[J].西安科技大学学报,2010,30(5):604-608.
- [23] 纪雪玲,李明,李玮.一种克服局部最优的收缩因子 PSO 算法[J].计算

机工程,2011,37(20):213-215.

- [24] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1):58-73.
- [25] 齐欣,靳雁霞,张晋瑞,等.大数据环境中简化粒子群算法的改进研究[J].微电子学与计算机,2020,37(2):25-29.
- [26] 牛在森,伊华伟,李晓会,等.融合层次聚类和粒子群优化的鲁棒推荐算法[J].小型微型计算机系统,2020,41(1):66-71.
- [27] 朱德刚,洪建,张洁.基于反向学习和高斯扰动的粒子群优化算法[J].计算机与数字工程,2019,47(12):2993-2998.
- [28] 孙骞,高岭,刘涛,等.基于熵模型的粒子群优化算法[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(6):1088-1093.
- [29] 杜振鑫,王兆青.一种个性化变异的免疫粒子群算法[J].计算机工程与应用,2011,47(27):44-48.
- [30] 胡锦帆,张晓伟,袁岐江,等.一种基于单纯形搜索的粒子群优化算法[J].计算机应用研究,2020,37(1):71-75.
- [31] CONN A R, SCHEINBERG K, VICENTE L N. Introduction to derivative-free optimization[M]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009:141-162.
- [32] 刘博,崔远来,尹杰杰,等.基于 DP-PSO 算法的灌区农业水资源优化配置[J].节水灌溉,2016(8):117-121.
- [33] 陈述,邵东国,李浩鑫,等.基于粒子群人工蜂群算法的灌区渠-塘-田优化调配耦合模型[J].农业工程学报,2014,30(20):90-97.
- [34] 马建琴,魏蕊,张鹏.基于免疫进化的粒子群算法在灌区水资源优化配置中的应用研究[J].华北水利水电学院学报,2011,32(5):35-38.
- [35] 陈晓楠,段春青,邱林,等.基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J].农业工程学报,2008,24(3):103-106.
- [36] 张倩,张建建,李涛,等.粒子群算法的改进及在农业水资源配置的应用[J].排灌机械工程学,2020,38(6):637-642.
- [37] 王守光,景朝霞,周正,等.基于差分粒子群算法的都江堰典型灌区水量优化配置[J].中国水运,2014,14(9):261-264.
- [38] 刘玉邦,梁川.免疫粒子群优化算法在农业水资源优化配置中的应用[J].数学的实践与认识,2011,41(20):163-171.
- [39] 刘照,程帅,李华朋,等.基于双层粒子群算法的下级渠道流量不等时渠系优化配水[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):88-93,237.
- [40] 刘照.基于 WebGIS 的盈科灌区渠系优化配水模型与系统研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2017.
- [41] 王庆杰,岳春芳,李艺珍,等.基于改进粒子群算法的两级渠道水资源优化配置[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):26-33.
- [42] 吴复昌.基于 PSO 算法的中型灌区输水调度模型研究[J].水利建设与管理,2019,39(7):72-76.
- [43] 王文婷,郭乙霏.基于粒子群算法的树状灌溉管网系统优化设计[J].节水灌溉,2018(5):75-78.
- [44] IBRAHIM MTOLERA. 基于粒子群算法的树状灌溉管网优化研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [45] 李嵩,周建平,许燕.基于 PSO 优化 Fuzzy-PID 精量灌溉控制系统设计[J].节水灌溉,2019(3):90-93.
- [46] 殷国玺,张展羽,张国华,等.基于粒子群优化算法的农田多目标控制排水模型[J].农业工程学报,2009,25(3):6-9.
- [47] 黎晓峰.石头河水库面向灌区水资源优化调度管理系统研究[D].西安:西安理工大学,2009.
- [48] 李欣欣,张宏立.投影寻踪模型在水稻灌溉制度评价中的应用[J].节水灌溉,2017(2):90-93.
- [49] 杨习清,谢军红.基于混合 PSO 算法的西北干旱区作物灌溉制度优化设计[J].节水灌溉,2013(8):25-27.
- [50] 靳燕国,孟凡玲,邱林,等.基于粒子群算法的作物灌溉制度优化设计[J].灌溉排水学报,2007,26(S1):51-52.
- [51] 周建学.膜下交替滴灌条件下番茄优化灌溉制度试验研究[J].甘肃水利水电技术,2016,52(7):61-63.
- [52] 李六杏,唐立.种植业结构调度的多目标优化模型及 PSO 并行算法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2020,22(1):60-62.
- [53] 郝小宇.基于水资源高效利用的榆林市农业种植结构优化研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [54] 王玉宝.节水型农业种植结构优化研究:以黑河流域为例[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [55] 王雷明.水资源约束条件下的农业种植结构优化研究:以河套灌区为例[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [56] 王燕云,龙爱华,向立云,等.基于 LP-PSO 的塔里木河流域农业种植结构优化研究[J].水利水电技术,2019,50(12):191-197.

- [8] 陈宝玲,王华新,龚建英,等.铁皮石斛林下栽培方法比较[J].广西林业科学,2018,47(3):301-305.
- [9] 胡峰,邱道寿,梅瑜,等.广东地区铁皮石斛林下仿野生栽培技术研究[J].广东农业科学,2016,43(2):35-38.
- [10] 吴应齐,王声淼,杨龙,等.锥栗林活树附生栽培铁皮石斛技术[J].上海农业科技,2015(5):94-95.
- [11] 张惠兰,梁东成,杨昌腾,等.铁皮石斛在粤北高海拔山区天然次生林的活树附生栽培研究[J].林业与环境科学,2017,33(5):78-82.
- [12] 唐黎明,陈云峰,戴勤,等.铁皮石斛林下栽培标准化技术示范成效初报[J].安徽农学通报,2015,21(20):45,53.
- [13] 梁琼芳,陈庭.铁皮石斛林下立体栽培比较研究[J].亚热带植物科学,2018,47(2):181-186.
- [14] 罗仲春,罗斯丽,罗毅波.铁皮石斛原生态栽培技术[M].北京:中国林业出版社,2013:33-62.
- [15] 邓杰玲,周锦业,黄昌艳,等.广西龙眼果园林下铁皮石斛仿野生栽培技术[J].中国热带农业,2018(6):71-73.
- [16] 李双龙,肖强,吴代坤,等.天保工程区混交林下铁皮石斛仿生态栽培技术研究[J].南方农业,2017,11(34):70-72.
- [17] 陈丽英,张惠兰,梁东成,等.铁皮石斛在粤北天然次生林下仿野生栽培技术[J].南方林业科学,2018,46(4):48-50.
- [18] 唐丽,王朝勇,龙华,等.环境因子对铁皮石斛生长发育及药效成分含量的影响[J].中药材,2019,42(2):251-255.
- [19] 杨丽丽,杨平飞,宋智琴,等.铁皮石斛绑缚梨树和杜仲树干仿野生栽培效果[J].农技服务,2019,36(7):45-46.
- [20] 刘明伟.铁皮石斛栽培的附主林木选择分析[J].花卉,2017(18):9-10.
- [21] 黄晓雅,吴珠,张在忠,等.铁皮石斛附生棕榈科植物对其相关性状的影响及栽培技术[J].安徽农学通报,2018,24(11):28-29.
- [22] 陈长远.铁皮石斛活树附生栽培树种选择[J].福建林业科技,2016,43(2):137-140.
- [23] 高伟华.勐腊县林下仿野生种植铁皮石斛技术[J].绿色科技,2018(7):92-93.
- [24] 耗才清,和玉德,石金荣,等.活树原生态附生石斛栽培技术研究[J].绿色科技,2018(1):189-191.
- [25] 张海龙.乐清市铁皮石斛附生栽培技术[J].现代农业科技,2017(9):105-106.
- [26] 崔之益,肖玉,杨曾奖,等.铁皮石斛种植技术体系[J].生态学杂志,2017,36(3):878-884.
- [27] 李志贤,林永珍,叶思群,等.铁皮石斛组培苗移栽与仿野生树栽研究[J].绿色科技,2017(11):231-232.
- [28] 陈向东.铁皮石斛林下种植营养土的配制与种树的选择[J].绿色科技,2017(5):43-45.
- [29] 苗志学,赵炳华.石斛仿野生人工栽培技术[J].云南农业科技,2010(6):23-25.
- [30] 徐超,张红岩,刘国华,等.菌根真菌对铁皮石斛的影响及其抗病机理研究[J].西部林业科学,2017,46(3):1-5.
- [31] 杨洪斌.仿野生林下种植铁皮石斛技术[J].云南林业,2016,37(5):64-65.
- [32] 莫德佳.刍议仿野生林下种植铁皮石斛技术特点[J].农业与技术,2018,38(21):84-85.
- [33] 陈晓梅,闫浩利,王春兰,等.菌根真菌 *Mycena* sp.对铁皮石斛生长和多糖化学性质的影响[J].中国科学:生命科学,2016,46(7):872-879.
- [34] 张洛妃.杉木病虫害药剂使用对林下经济的影响[J].现代园艺,2016(5):125-126.
- [35] 王淑媛,吴令上,董洪秀,等.铁皮石斛种质和附生立木对其内生真菌菌群的影响[J].中国中药杂志,2018,43(8):1588-1595.
- [36] 胡丹.不同附主栽植季节对活树附生栽培铁皮石斛生长影响的研究[J].福建林业,2016(3):30-32.
- [37] 王晖,姜武,陶正明,等.不同树种附生铁皮石斛栽培技术及品质探讨[J].浙江农业科学,2017,58(7):1181-1182.
- [38] 谢静,许环映,吴建涛,等.栽培基质对铁皮石斛生长的影响[J].热带作物学报,2017,38(1):28-32.
- [39] 朱肖峰,王玉艳.铁皮石斛活树附生栽培试验[J].浙江农业科学,2018,59(5):753-756.
- [40] 柯碧英,张华通,林晓萍.铁皮石斛仿野生栽培技术[J].广东林业科技,2015,31(3):123-125.
- [41] 姚志鹏.铁皮石斛仿野生贴树栽培试验初报[J].农业与技术,2015,35(6):9.
- [42] 潘鸿,廖南燕,潘子来,等.铁皮石斛仿野生栽培技术研究[J].绿色科技,2017(7):142-143,149.
- [43] 邵华,张玲琪,李俊梅,等.铁皮石斛研究进展[J].中草药,2004,35(1):109-112.
- [44] 聂少平,蔡海兰.铁皮石斛活性成分及其功能研究进展[J].食品科学,2012,33(23):356-361.
- [45] 杨虹,王顺春,王峰涛,等.铁皮石斛多糖的研究[J].中国药杂志,2004,39(4):254-256.
- [46] 高亭亭,斯金平,朱玉球,等.光质与种质对铁皮石斛种苗生长和有效成分的影响[J].中国中药杂志,2012,37(2):198-201.
- [47] 姜波,彭鹏,倪向全,等.不同铁皮石斛栽培品系感官评价与多糖含量比较研究[J].常熟理工学院学报,2019,33(2):105-107,124.
- [48] 刘文杰,孙志蓉,杜远,等.不同产地铁皮石斛主要化学成分及指纹图谱研究[J].北京中医药大学学报,2013,36(2):117-120.
- [49] 李宏杨,谭啸,刘扬,等.铁皮石斛多糖含量变化研究[J].中国热带农业,2017(2):59-61.
- [50] 肖强,杨丛,张峥,等.不同仿生态栽培方式对铁皮石斛多糖积累影响[J].中国农学通报,2015,31(10):142-147.
- [51] 郭英英,诸燕,斯金平,等.铁皮石斛附生树种对多糖含量的影响[J].中国中药杂志,2014,39(21):4222-4224.
- [52] 金辉,元志华,陈晖,等.菌根真菌对铁皮石斛生长和矿质元素的影响[J].福建林学院学报,2007,27(1):80-83.

(上接第20页)

- [57] 徐磊.区域农业水资源系统恢复力特征及其对农业种植结构影响效应研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [58] 杨习清,柴强,谢军红.基于多作物总产量最大的灌溉优化模型与算法研究[J].中国农村水利水电,2015(5):11-13,22.
- [59] 罗永恒,张蜜,周建华.基于粒子群算法的水稻用水的优化配置[J].经济数学,2012,29(1):65-68.
- [60] 郭丽丽,刘勇,令狐琛,等.粒子群优化BP算法在温室农作物所需空气湿度中的应用[J].黑龙江大学学报,2020,11(1):91-96.
- [61] 高燕,刘红霞.一种基于PID神经网络的农作物土壤湿度控制算法[J].计算机与现代化,2017(6):122-126.
- [62] 刘玉甫,曹伟.基于支持向量机优化粒子群算法的作物生育期ET₀预测[J].现代农业科技,2014(2):219-220,228.
- [63] 孙艳,刀海娅.自适应变异粒子群算法与支持向量机在农业用水预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):231-236,240.
- [64] 胡永.浑蒲灌区作物需水量实时预报研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2007.
- [65] 刘天凤.基于作物蒸腾量智能预测的农田优化灌溉系统[D].上海:东华大学,2018.