温度对肥料性能的影响研究进展及展望

覃小玲，钱　勇，雷　雯，张丹仙，韩德鑫，杨志云

（贵阳开磷化肥有限公司，贵州 贵阳　551109）

［摘　要］温度是影响肥料物理与化学性能的关键环境因子。系统综述不当的温度（尤其是高温）对肥料性能的双重影响机制：在物理层面，高温通过加速水分迁移、溶解–再结晶过程及诱导热应力，导致肥料颗粒强度下降、吸湿结块加剧；在化学层面，高温会改变控释肥包膜渗透性，加速养分扩散与化学降解，造成养分过早释放或有效性降低。针对这些问题，提出优化包装材料（如高阻隔性复合膜）与改进生产工艺（如充分冷却、表面包膜）等策略，并展望未来研究方向，包括开发温度响应型智能肥料、利用机器学习和人工智能预测温度–肥料相互作用，发展可持续包装解决方案，标准化养化释放和有效性评估方法，研究多因素耦合作用。

［关键词］肥料；温度；颗粒强度；养分释放；控释肥；可持续农业

［中图分类号］TQ440.6　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097–4566（2026）06–0062–05

Research progress on effect of temperature on fertilizer performance and prospect

QIN Xiaoling, QIAN Yong, LEI Wen, ZHANG Danxian, HAN Dexin, YANG Zhiyun

(*Guiyang Kailin Chemical Fertilizer Co., Ltd., Guiyang* 551109, *China*)

Abstract: Temperature is a critical environmental factor affecting the physical and chemical properties of fertilizers. The dual impact mechanisms of improper temperatures (especially high temperatures) on fertilizer performance are systematically reviewed. At the physical level, high temperatures accelerate moisture migration, dissolution-recrystallization processes, and induce thermal stress, leading to reduced particle strength and aggravated hygroscopic caking; At the chemical level, high temperatures alter the permeability of controlled-release fertilizer coatings, accelerate nutrient diffusion and chemical degradation, resulting in premature nutrient release or reduced availability. To address these issues, strategies are proposed such as optimizing packaging materials (such as high-barrier composite films) and improving production processes (thorough cooling, surface coating), while future research directions are also outlined, including the development of temperature-responsive smart fertilizers, using machine learning and artificial intelligence to predict temperature-fertilizer interactions, advancing sustainable packaging solutions, standardized nutrient release and effectiveness evaluation methods, studying the coupling effects of multiple factors.

Key words: fertilizer; temperature; particle strength; nutrient release; controlled-release fertilizer; sustainable agriculture

0　引言

肥料是现代农业生产中不可或缺的投入品，对于提高农作物产量、改善农产品品质以及保障全球粮食安全具有举足轻重的作用[1–2]。随着全球人口持续增长和对农产品需求的不断增加，肥料的高效利用变得尤为重要。然而，肥料从生产、包装、储存、运输到最终使用的整个链条中，其性能极易受到多种环境因素的影响，其中，温度是影响肥料物理、化学性能最关键的环境变量之一[3–6]。不当的温度，可能会引发一系列连锁反应，从而损害肥料的品质和效力。例如，在颗粒复合肥生产中，包装前的冷却温度被证明对储存过程中肥料颗粒的干燥、结块现象以及养分释放行为具有显著影响[5]。对于控释肥（CRFs）而言，其核心功能在于根据植物生

收稿日期：2026–01–19

作者简介：覃小玲（1997—　），女，贵州贵阳人，助理工程师，从事精细磷化工、磷复肥研究。

通信作者：钱　勇（1979—　），男，贵州贵阳人，工程师，从事磷复肥生产及研究。

长需求调节养分释放速率，而环境温度直接决定了包膜材料的渗透性、溶解性以及内部养分的扩散速率，进而决定了养分的有效释放模式[3-4,6]。因此，深入理解温度对肥料性能的影响机制，并在此基础上采取有效的控制和优化策略，对于提升肥料利用效率、减少环境污染以及推动农业可持续发展具有深远的理论和实践意义。

本文旨在探讨温度对肥料物理性能（如结块和颗粒强度）和化学性能（如养分释放速率和成分稳定性）的影响，总结当前温度控制优化策略，并展望未来的研究方向，以期为肥料行业提供有价值的参考。

1　包装温度对肥料物理性能的影响

包装温度主要通过影响肥料颗粒内部的水分状态、晶体结构和机械稳定性，对其物理性能产生显著影响，其中最主要的表现为对颗粒强度、吸湿性和结块的影响。

1.1　包装温度对肥料吸湿性和结块的影响

肥料的吸湿性是指其从周围环境中吸收水分的能力，这使其对气候条件，特别是湿度和温度，表现出高度的敏感性。储存条件，尤其是温度和相对湿度的波动，会显著影响肥料的自由流动性能，即其抵抗结块的能力[5,7]。

当颗粒复合肥在较高温度下包装时，颗粒内部残留的水加速蒸发，导致包装袋内部环境的相对湿度显著升高。这种高湿环境为肥料颗粒表面吸附水分提供了有利条件，颗粒表面的盐溶解形成饱和溶液，当温度降低或湿度下降时，这些溶解的盐分会重新结晶，并在颗粒间形成坚固的晶体桥，导致颗粒之间牢固地结合形成团块，即结块[5]。硝酸铵钙等高吸湿性肥料，其结块问题在潮湿和高温环境下尤为突出[7]。它们易于吸收空气中的水分，导致颗粒表面溶解，随后在水分蒸发或温度降低时重新结晶，形成坚硬的团块，严重损害肥料的自由流动性[7]。

颗粒表面水分是肥料结块的关键影响因素，高温会加速水分迁移、溶解–再结晶及颗粒间物理化学作用，高温包装会促使内部水分迁移至表面、增加颗粒黏性，加剧结块。因此，控制包装温度、确保包装前充分冷却，是预防吸湿结块、维持肥料物理性能的关键[8-9]。

1.2　包装温度对肥料颗粒强度的影响

肥料颗粒强度是衡量其在储存、运输和施用过程中抵抗外力破碎能力的重要指标。如果颗粒强度不足，肥料在搬运和施用过程中容易破碎，不仅影响施肥均匀性，还会增加粉尘污染和养分损失。

研究表明，在颗粒复合肥生产过程中，如果肥料在较高温度下被包装，会导致肥料结块。肥料结块发生会使颗粒之间的结合力增强，但整体结构完整性受损，在搬运和施用过程中更易破碎[8]。结块不仅会降低肥料的流动性，还会使肥料颗粒强度受损，从而影响施肥的均匀性和效率。

此外，过高的包装温度可能导致肥料颗粒在冷却过程中经历较大的温度梯度[5]。这种温度差异会在肥料颗粒内部产生热应力，尤其是在肥料颗粒尺寸较大或冷却速率过快的情况下，这种热应力在微观层面上可能导致颗粒结构缺陷和裂纹产生或扩展，从而削弱肥料颗粒的结构完整性，使其机械强度下降[8]。现有研究主要关注结块对颗粒强度的间接影响，包装温度过高引起的内部热应力对颗粒强度影响的直接机制仍有待深入研究。然而，颗粒强度降低无疑会增加肥料在机械处理过程中产生粉尘量，不仅造成养分损失，还会对操作人员健康和环境造成负面影响。

包装温度影响肥料颗粒强度的内在机制如图1所示。

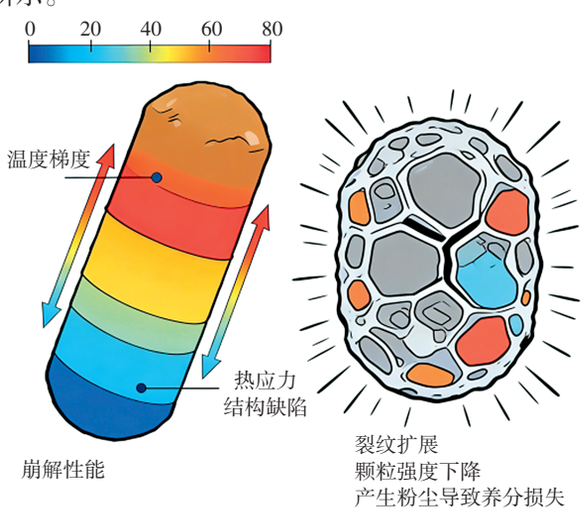

图1　包装温度影响肥料颗粒强度的内在机制

Fig. 1　The intrinsic mechanism by which packaging temperature affects the strength of fertilizer particles

2　温度对肥料化学性能的影响

温度不仅会影响肥料中有效成分的化学稳定性，还会影响养分释放速率，可能导致养分降解、转化或损失，从而降低肥料的实际肥效。

2.1　温度对肥料成分稳定性的影响

尿素作为广泛使用的氮肥，在高温条件下极易发生水解和分解反应，导致氨（NH_3）挥发和二氧化碳（CO_2）排放。高温会显著加速尿素的水解过

程，生成碳酸铵，进而分解产生NH_3和CO_2。这不仅意味着氮素养分的浪费，也对环境造成负面影响[10]。

复合肥中的硝酸盐成分在特定条件下（如与有机物接触、高温）可能引起自热反应。这是一种放热的氧化还原反应，硝酸盐作为氧化剂，有机物作为还原剂，在高温下反应速率加快，不仅会降低肥料的有效性，还可能存在安全隐患，甚至导致火灾或爆炸。

对于粪源肥料（FDF），温度对其病原体载量、重金属和养分水平的影响也至关重要。高温储存可能会加速有机质的矿化，导致氮素以氨的形式损失，同时也会影响磷、钾等其他养分的有效性（见表1）。因此，严格控制包装和储存温度，对于维护肥料的化学完整性和最大限度地减少养分损失至关重要[11]。

表1　储存温度对粪便衍生肥料的pH、电导率和营养特性的影响

Table 1　The effects of store temperature on the pH, conductivity, and nutritional characteristics of fecal derived fertilizers

肥料	温度/℃	pH	电导率/(mS·cm^{-1})	w(有机碳)/%	w(总氮)/%	w(NH^+_4–N)/(mg·kg^{-1})	w(NO^-_3–N)/(mg·kg^{-1})	w(总磷)/%	w(总钾)/%
富集联堆肥	5	7.5	14.7	27.8	2.5	1 038	187	4.7	2.0
	25	7.5	14.1	27.9	2.6	1 026	213	3.5	2.6
	23	7.5	14.2	26.8	2.2	975	172	3.8	2.2
联堆肥	5	8.7	5.4	27.0	1.2	32	115	3.6	3.1
	25	8.7	5.4	26.9	1.1	33	115	2.2	2.9
	23	8.7	5.4	26.6	1.2	42	135	2.6	2.8

高温储存也可能加速肥料中其他易降解或易挥发组分的分解。例如，某些有机螯合微量元素肥料中的螯合剂在高温下可能不稳定，导致微量元素从螯合状态中释放，从而影响其在土壤中的有效性和移动性。此外，某些肥料中的添加剂或辅助成分在高温下也可能分解或挥发，影响肥料的整体质量和功能。在肥料制造过程中，通过产品设计可以提高其化学稳定性，例如优化颗粒结构、添加稳定剂或使用惰性包衣材料，以提高肥料对温度波动的抵抗力，减少粉尘和结块的形成，并降低NH_4^+–N的分解[7]。

2.2　温度对肥料养分释放速率的影响

控释肥（CRFs）旨在通过调节养分释放与作物需求同步，以提高养分利用效率并减少环境流失。温度作为影响控释机制的关键外部刺激因素，对养分释放速率具有显著调节作用[12]。多项研究证实了温度与控释肥养分释放速率之间的正相关关系。例如，在5～45 ℃的温度范围内，树脂包膜控释肥的溶解盐释放速率随着温度的升高而显著加快。具体而言，当温度从较低值升高时，包膜的渗透性增强，内部养分扩散速率增加，导致养分更快地释放出来[6,13]。有机聚合物包膜控释磷肥的磷释放特性也表现出强烈的温度依赖性。在20、30、40、50 ℃下进行的实验表明，磷的初步溶解度、差异溶解度、7 d溶解度和总释放周期均受温度的显著影响[13]。通常，较高的温度会加速包膜的降解或软化，增加水分子进入包膜内部的速率，从而促进养分的溶解和释放。

3　温度控制的优化策略

为了最大程度地保持肥料性能，降低温度带来的不利影响，需要从包装材料和生产工艺两方面进行综合优化。

3.1　包装材料的选择

选择具有良好阻隔性、机械强度和热稳定性的包装材料，对于在不同温度条件下维持肥料品质至关重要。包装材料应能有效阻隔外部水分和氧气，防止肥料吸湿结块和氧化分解，同时也要能承受储存和运输过程中的温度波动和机械应力。

其中，铝塑复合膜（ALPB）等复合包装材料在控制产品水分和阻隔气体方面表现出卓越性能。研究表明，黑蒜用铝塑复合膜包装后在4 ℃和20 ℃储存90 d后，ALPB组储存后的总蛋白质含量均低于聚对苯二甲酸乙二醇酯瓶（PETB）和牛皮纸袋（KPB）；其中PETB组在4 ℃储存时的蛋白质质量分数达13.41%，为试验组中最高值；KPB组的总糖质量分数介于58.73%至59.87%之间，远低于另外两个包装组；ALPB组的总糖及还原糖含量最高，说明采用ALPB材料包装的黑蒜能有效保留其含有的生物活性成分[14]。这表明多层复合膜可以为肥料提供更稳定的微环境，尤其是在温度波动较大的储存条件下。考虑到环境可持续性，可生物降解的淀粉/聚对苯二甲酸–己二酸丁二醇酯

（PBAT）复合膜作为控释肥的包装材料，展现出良好的疏水性和控释特性，是未来研究和应用的重要方向[15]。

3.2 生产工艺的改进

优化生产工艺对于防止肥料在储存过程中因温度变化影响而发生不良变化至关重要。

（1）颗粒复合肥在包装前进行充分冷却是减少包装袋内后续结块风险的有效措施。通过将肥料温度降低到接近环境温度，可以减少颗粒内部水分的蒸发，从而降低包装袋内的相对湿度，抑制结块发生[5]。

（2）结合肥料性能采用最合适的包膜技术，通过在颗粒表面形成光滑致密的薄膜，可以显著降低肥料的初始养分释放速率，包裹膜可以为肥料提供一道物理屏障，减少水分渗透和热量传递，提高其对温度波动的抵抗力，在一定程度上降低温度对肥料性能的影响。如使用乙基纤维素对尿素进行包膜，可以显著降低初始养分释放速率[16-17]。

（3）改进肥料颗粒的物理化学结构，如优化颗粒密度、孔隙率和表面粗糙度等，以提高固体肥料的性能，减少粉尘和结块的形成，并增强其对机械应力和温度变化的稳定性[7]。

（4）开发快速评估复合肥崩解性能的方法，例如通过研究筛网、崩解时间、温度和水肥比等因素对崩解的影响，对于优化肥料生产和储存过程具有重要的指导意义。这些方法可以帮助生产商在生产过程中及时调整工艺参数，确保肥料质量[18]。

4 未来研究方向与展望

随着气候变化日益加剧以及对农业可持续性的更高要求，温度对肥料性能影响的研究将持续深入，并向更智能化、精细化的方向发展。

（1）温度响应型智能肥料的开发：现有控释肥的养分释放速率普遍受温度影响，这使得在温度波动较大的环境中难以精确匹配作物需求。未来的研究应聚焦于开发更先进的温度响应型智能肥料，使其能够根据环境温度的变化，通过智能材料（如形状记忆聚合物、温敏水凝胶）自动调节养分释放速率。这类肥料有望在按需提供养分的同时，最大限度地减少养分流失。

（2）利用机器学习和人工智能建立预测模型：气候变化导致农业环境的不可预测性增加。未来的研究可以利用机器学习和人工智能技术，整合历史气候数据（温度、降水）、土壤特性、作物类型和肥料配方等多种数据源，构建复杂的预测模型[19-20]。这些模型能够更精确地预测不同包装温度和储存条件下肥料的物理、化学变化，并为农民提供精细化的施肥建议，从而实现精准农业管理。

（3）可持续包装解决方案的探索：当前的肥料包装材料多为塑料，其环境负荷日益受到关注。未来的研究应积极探索生物可降解、可回收或可再生的包装材料，同时确保这些材料在各种包装温度下仍能维持肥料的性能和稳定性。例如，生物聚合物基缓/控释肥作为可持续肥料，其自身的养分释放机制与农业可持续性高度相关，未来的包装也应向生物基方向发展。

（4）标准化养分释放和有效性评估方法：针对新型高效肥料，尤其是智能控释肥，开发一套标准化、统一的养分释放动力学和生物有效性评估方法至关重要。这些方法应能模拟不同环境温度下的真实情况，为肥料产品的研发、质量控制和市场推广提供科学依据。

（5）多因素耦合作用研究：除了温度，湿度、光照、机械应力等多种因素也会共同影响肥料性能。未来的研究应采用多因素耦合实验设计，更全面地揭示这些因素与包装温度之间的交互作用机制，为肥料的储存和管理提供更全面的解决方案。

5 结论

温度是影响肥料物理、化学性能的关键环境因素，对肥料的储存稳定性、养分释放效率以及最终对作物生长的影响具有决定性作用。高温环境可能导致肥料吸湿结块，降低颗粒强度，从而影响肥料的流动性和使用性能。对于缓/控释肥料，不当的温度会加速养分过早释放或促使其降解，导致养分流失，降低肥料的利用效率，无法与农作物生长需求有效匹配。

为了应对温度对肥料性能的不利影响，采取有效的优化策略至关重要。这包括精选具有高阻隔性、高机械强度和热稳定性的包装材料，例如多层复合膜，以有效隔离外部环境。同时，改进生产工艺，特别是确保肥料在包装前充分冷却，以及通过颗粒表面处理等技术增强其抵抗温度波动的能力，是维持肥料质量的关键措施之一。

未来肥料研发将以绿色可持续为核心导向：重点研制温敏型控释肥料，耦合机器学习构建多环境（含温度变幅）肥料效能预测模型，支撑精准施肥体系构建；同步开展生物降解包膜材料研发与粪肥储贮工艺优化。上述技术革新可提升肥料利用率、

适配气候变化，实现肥料资源高效管控，助力粮食稳产与农业面源污染减排。

[参考文献]

[1] QUAN Q, YI F J, LIU H F. Fertilizer response to climate change: Evidence from corn production in China[J]. Science of The Total Environment, 2024, 928: 172226.

[2] YESSOUFOU M W I A, TOVIHOUDJI P G, ZAKARI S, et al. Hill-placement of manure and fertilizer for improving maize nutrient- and water-use efficiencies in the northern Benin[J]. Heliyon, 2023, 9(7):e17823.

[3] LAMONT G P, WORRALL R J, O'CONNELL M A. The effects of temperature and time on the solubility of resin-coated controlled-release fertilizers under laboratory and field conditions [J]. Scientia Horticulturae, 1987, 32: 265-273.

[4] ENGELSJORD M E, FOSTAD O, SINGH B R. Effects of temperature on nutrient release from slow-release fertilizers[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1996, 46(3): 179-187.

[5] WALKER G M, MAGEE T R A, HOLLAND C R, et al. Granular fertilizer drying and agglomeration in storage [J]. Drying Technology, 2000, 18(1/2): 493-502.

[6] IBRAHIM A A, JIBRIL B Y. Controlled Release of Paraffin Wax/Rosin-Coated Fertilizers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(7): 2288-2291.

[7] KAYALIOĞLU A. Alternative solutions for the physicochemical evaluation and improvement of the caking properties of calcium ammonium nitrate fertilizer as a quality problem under atmospheric conditions[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2023, 46(7): 795-804.

[8] BRÖCKEL U, HAHN C. Product Design of Solid Fertilizers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(11): 1453-1457.

[9] 张兵印,茹铁军,乔荣广.复合肥结块因素的实验研究[J].河北化工,2009,32(3):20-21,43.
ZHANG B Y, RU T J, QIAO R G. Studies on Caking Factors of Compound Fertilizer[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry, 2009,32(3):20-21,43.

[10] SIMAN F C, ANDRADE F V, PASSDS R R, et al. Nitrogen Fertilizers and Volatilization of Ammonia, Carbonic Gas Emissions and Urease Activity [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(4): 426-438.

[11] NARTEY E G, SAKRABANI R, TYRREL S, et al. Storage duration and temperature affect pathogen load, heavy metals, and nutrient levels in faecal derived fertiliser[J]. Environmental Technology, 2024, 45(27): 5827-5837.

[12] QIAO D, LI J, ZHANG S, et al. Controlled release fertilizer with temperature-responsive behavior coated using polyether polyol (PPG)/ polycaprolactone (PCL) blend-based polyurethane performs smart nutrient release[J]. Materials Today Chemistry, 2022, 26: 101249.

[13] 赵秀芬,房增国,赵钢.温度对几种有机高聚物包膜控释肥磷素释放特性的影响[J].仲恺农业技术学院学报,2007(1):29-32.
ZHAO X F, FANG Z G, ZHAO G. Effects of temperature on phosphorus releasing characteristics of organic polymer coating controlled-release fertilizers[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology, 2007(1):29-32.

[14] ING Y, JIANG Y, DENG Y, et al. Effect of packaging materials and storage temperature on water status, mechanical and thermal properties of black garlic[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100507.

[15] FIRMANDA A, FAHMA F, SYAMSU K, et al. Biopolymer-based slow/controlled-release fertilizer (SRF/CRF): Nutrient release mechanism and agricultural sustainability[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 112177.

[16] YUAN S N, ZHOU T, TAN Z X. New straw coating material for improving the slow-release performance of fertilizers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(33): 39818-39826.

[17] 王艳,郑西来,段玉环,等.包膜肥料氮素释放特性的影响因素研究[J].土壤与作物,2017,6(1):73-79.
WANG Y, ZHENG X L, DUAN Y H, et al. Factors affecting nitrogen release characteristics to coated fertilizers[J]. Soil and Crops, 2017, 6(1):73-79.

[18] HE Y Y, HUANG C N, ZHAI H B, et al. A simple and rapid method for evaluating the disintegration performance of compound fertilizer[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2024, 70(1): 1-12.

[19] GOMATHY D C K. The precision agriculture using artificial intelligence [J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2021,9:342-345.

[20] SHILPA C, SANDEEP K, MONALI G. Empowering agriculture: Leveraging intelligent systems for sustainable farming [J]. Journal of Electrical Systems, 2024,20(2):970-979.