◆健康保育与环境修复◆

环境中多聚磷酸盐的水解研究进展

张胜男，骆　梦，崔腾权，程　微

（中南民族大学 资源与环境学院，湖北 武汉　430074）

［摘　要］磷是生命必需的关键营养元素，其环境行为直接影响生态系统功能与水环境质量。多聚磷酸盐（PolyP）作为一种重要的磷形态，因其在水处理、肥料、食品添加剂等领域的广泛应用而大量释放至土壤、水体和沉积物等环境介质中。在特定环境条件下，PolyP水解生成正磷酸盐，这不仅影响磷的生物有效性，还可能导致水体富营养化。因此，深入理解PolyP在环境中的转化机制及其地球化学行为，对评估其环境影响和制定污染控制策略具有重要意义。系统综述环境中PolyP的水解途径（酶促、有机酸及矿物催化）与分子机制（末端/中间断链），重点探讨pH、温度、金属阳离子、矿物界面及链长结构等对水解动力学的调控规律。现有研究表明，酸性条件、高温及特定金属氧化物（如铁/锰氧化物）可显著加速PolyP向正磷酸盐的转化，且长链PolyP通常具有更高的反应活性。针对当前单一体系研究与复杂环境脱节的问题，指出未来应聚焦于多因素耦合机制、微观界面过程解析及污染管控技术应用，为精准评估PolyP的环境归趋与磷资源管理提供理论依据。

［关键词］多聚磷酸盐；水解机制；环境因子；界面催化；富营养化；磷循环

［中图分类号］X522　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0100-07

Research progress on the hydrolysis of polyphosphate in the environment

ZHANG Shengnan，LUO Meng，CUI Tengquan，CHENG Wei

（*College of Resources and Environment*，*South-Central Minzu University*，*Wuhan* 430074，*China*）

Abstract：Phosphorus is an essential nutrient for life, and profoundly influences ecosystem functions and water quality through its environmental transformations. Polyphosphate（PolyP），a significant phosphorus species, has been widely released into soil, water bodies, and sediments due to its extensive applications in water treatment, fertilizers, and food additives. Under specific environmental conditions, PolyP hydrolyzes to orthophosphate, impacting phosphorus bioavailability and potentially causing eutrophication. Therefore, a thorough understanding of PolyP's transformation mechanisms and geochemical behavior in the environment is vital for assessing its impacts and developing pollution control strategies. The hydrolysis pathways（enzymatic, organic acid, and mineral catalysis）and molecular mechanisms（terminal/intermediate chain cleavage）of PolyP in environmental contexts are reviewed, with a focus on the regulatory effects of multidimensional factors such as pH, temperature, metal cations, mineral interfaces, and chain length structure on hydrolysis kinetics. Existing studies indicate that acidic conditions, high temperatures, and specific metal oxides（iron/manganese oxides）can significantly accelerate the conversion of PolyP to orthophosphate, with long-chain PolyP generally exhibiting higher reactivity. Addressing the disconnect between current single-system research and complex environmental conditions, the review suggests future efforts should prioritize coupled multi-factor mechanisms, microscopic interfacial process analysis, and the application of pollution control technologies to provide a theoretical basis for accurately assessing PolyP's environmental fate and phosphorus resource management.

Key words：polyphosphate；hydrolysis mechanism；environmental factors；interfacial catalysis；eutrophication；phosphorus cycle

收稿日期：2025-11-05

作者简介：张胜男（1999—　），女，湖北恩施人，硕士，研究方向为多聚磷酸盐水解。

通信作者：程　微（1988—　），女，湖北天门人，博士，副教授，研究方向为污染物的迁移转化机理研究。

基金项目：湖北省自然科学基金项目（2025AFB657）

0　引言

磷（P）是所有生命体不可或缺的关键营养元素，其在自然界中的赋存形态及转化过程深刻影响着生态系统的功能和物质循环[1]。环境中的磷主要以无机磷（包括正磷酸盐、多聚磷酸盐等）和有机磷的形式存在[2]。多聚磷酸盐（polyphosphate，PolyP）是由两个或多个磷酸基团通过磷酸酐键（P—O—P）连接而成的聚合物[3-4]，是重要的磷储库之一。

PolyP广泛存在于生物体内，并通过微生物的生命活动（如细胞外分泌、死亡、溶解）释放至环境介质。此外，PolyP也是一种重要的工业化学品[5]，其大规模生产和应用，不可避免地促使PolyP释放进入土壤、水体和沉积物，增加了其在环境中的浓度。

PolyP在环境中的转化主要是水解反应，该过程逐步释放出可被生物利用的正磷酸盐[6]。一方面，释放的正磷酸盐可作为植物和微生物的磷源，对维持生态系统功能至关重要；另一方面，过量的正磷酸盐输入可能引发藻类暴发，导致水体富营养化[7-8]。然而，现有环境磷循环研究的重点往往集中在正磷酸盐的迁移、转化与去除，对PolyP这一重要磷形态在环境中的赋存、转化机制及环境归趋的关注相对不足。因此，深入理解PolyP在自然环境中的水解途径、影响因素及其地球化学行为，对准确评估其生物有效性、环境影响以及制定有效的磷资源管理和污染控制策略具有重要现实需求。

本文旨在系统梳理和评述当前环境中PolyP水解研究的最新进展，包括PolyP的结构、性质与应用，PolyP在环境中的水解途径与机制，并深入分析影响水解速率的关键环境因子和PolyP自身特性。最后，对未来研究方向进行展望，以期为相关领域的研究提供参考。

1　PolyP的结构、性质与应用

PolyP是由磷酸残基通过磷酸酐键（P—O—P）连接形成的聚合物，其链长可从两个磷酸单元（焦磷酸）到数百个磷酸单元不等。根据化学结构不同，PolyP主要分为3类：线性PolyP，其通式为$[P_nO_{3n+1}]^{(n+2)-}$，基本单元为正磷酸根离子（PO_4^{3-}）；环状PolyP（又称为偏磷酸盐），结构为闭合环状；支化PolyP（如超磷酸盐），具有更复杂的空间结构[9-11]。不同结构形式的PolyP在化学稳定性、反应活性等方面存在差异。

PolyP因其成本效益高、无毒且可生物降解的特性，已广泛应用于多个工农业领域（见图1）[5]。在农业应用中，PolyP常作为肥料，如多聚磷酸铵[12]，富含磷和氮，可用于土壤改良、微藻养殖，以及作为鱼类饲料添加剂，以提升产量和营养价值。在工业应用中，PolyP凭借卓越的缓冲能力、聚阴离子特性、高保水性和抗菌活性，成为食品添加剂、水处理剂和阻燃剂的关键组分。具体而言，在食品工业中，其强大的氢键结合能力使其成为有效的保水剂和抗冻剂，并能提供必需矿物质[13-14]。在水处理领域，PolyP对铁、锰、钙等金属离子的强螯合作用使其成为有效的阻垢剂、缓蚀剂和阴极抑制剂，通过溶解矿物垢和抑制腐蚀来提高水系统承载能力。此外，PolyP还是一种高效无卤无毒的无机阻燃剂[15]，在高温下释放蒸汽形成隔热泡沫层，阻止火焰蔓延。总而言之，PolyP的广泛应用导致其在生产、使用和处置过程中不可避免地释放到各类环境介质中，构成潜在的环境污染源。

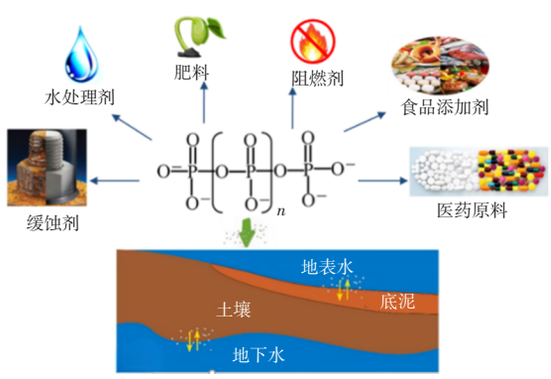


图1　多聚磷酸盐的广泛应用及在环境中的迁移

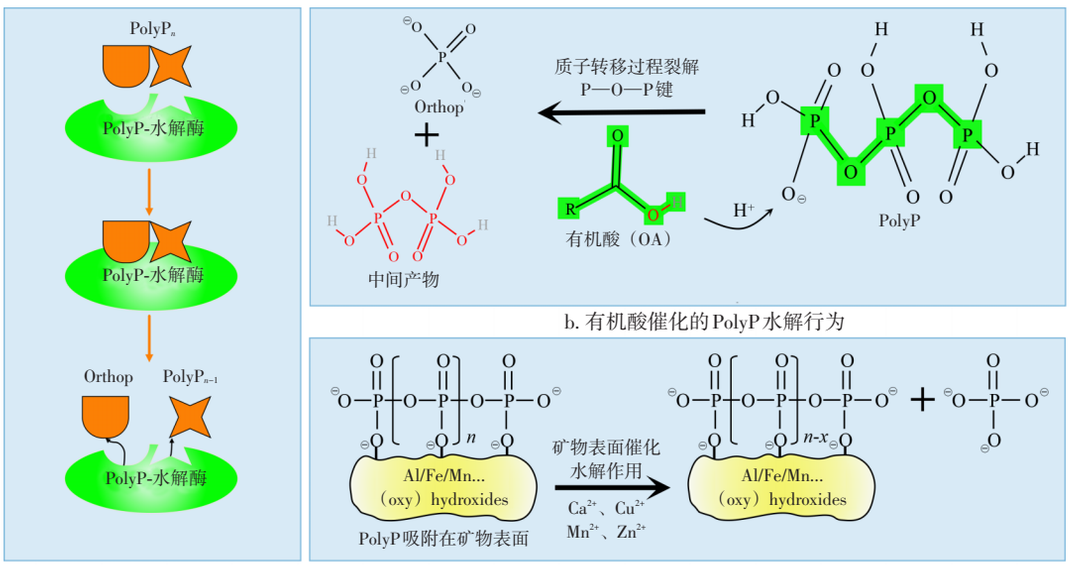
Fig. 1　Widespread application of polyphosphates and their migration in the environment

2　PolyP的水解途径与机制

PolyP在环境中的主要转化途径为水解反应，即PolyP分子中的磷酸酐键（P—O—P）与水反应并逐步生成正磷酸盐[16]。总体上，PolyP的水解可以实现从聚合态磷向单体磷酸盐的转化。PolyP的水解可以由生物因素（如微生物和磷水解酶）和非生物因素（如pH、温度、金属离子、矿物等）共同驱动。研究表明，在低温（10～20 ℃）下，化学水解可能占主导地位；而在较高温度（30～50 ℃）范围内，酶促水解反应则更为活跃[6]。PolyP的水解速率和产物形态受到其自身结构特性以及多种环境因子复杂相互作用的影响。

2.1　水解机制

在环境中，PolyP的水解主要通过以下3种机制实现（见图2）。



a. 磷水解酶介导的PolyP水解行为　b. 有机酸催化的PolyP水解行为　c. 矿物催化的PolyP水解行为

图2　PolyP在环境中的几种水解行为

Fig. 2　Several hydrolytic behaviors of PolyP in the environment

2.1.1　磷水解酶介导的PolyP水解

植物和微生物产生的各种磷水解酶是PolyP水解的重要生物催化剂。这些酶能够特异性地裂解PolyP链中的P—O—P键，释放出正磷酸盐[17-18]。根据作用位点，磷水解酶可分为外切酶和内切酶。外切磷水解酶作用于PolyP链的末端，逐步释放单体磷酸盐；内切磷水解酶则作用于PolyP链的中间，生成更短的PolyP链，这些短链PolyP随后在其他磷酸酶作用下进一步水解[19]。研究证实，酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和焦磷酸酶等多种酶类均表现出促进PolyP水解的活性[20]。

2.1.2　有机酸催化的PolyP水解

有机酸，特别是植物根系分泌和微生物代谢产生的有机酸，可以通过质子转移和络合作用加速PolyP的水解。有机酸的存在通常意味着较低的pH，而酸性环境是促进PolyP化学水解的关键因素[21]。在酸性条件下，PolyP链上的P—O—P键更容易发生质子化，形成更易受到亲核进攻的中间体，从而促进水分子或羟基离子的攻击，实现P—O—P键的断裂。

2.1.3　矿物催化的PolyP水解

土壤和沉积物中的金属氧化物（如铝、铁、锰的氧化物/氢氧化物）对PolyP水解具有显著的催化作用。PolyP能够吸附在这些矿物表面，形成表面络合物[22-24]。矿物表面提供的活性位点（如羟基、金属离子）能够稳定PolyP，并促进P—O—P键的活化和水解。值得注意的是，特定金属阳离子（如Ca^{2+}、Zn^{2+}、Mn^{2+}和Cu^{2+}等）能进一步增强矿物表面的催化活性。Zhou等[25]的研究表明，PolyP在水解释放正磷酸盐之前，会优先吸附在土壤矿物表面。李咏芳等[26]利用^{31}P固体核磁共振技术，深入探究了勃姆石对PolyP的微观吸附机制。他们发现，吸附过程伴随着PolyP的水解，长链PolyP中间的P—O—P键随机断裂，生成了短链PolyP和正磷酸根；这些产物随后以内圈络合的形式吸附在勃姆石表面，如图3所示。

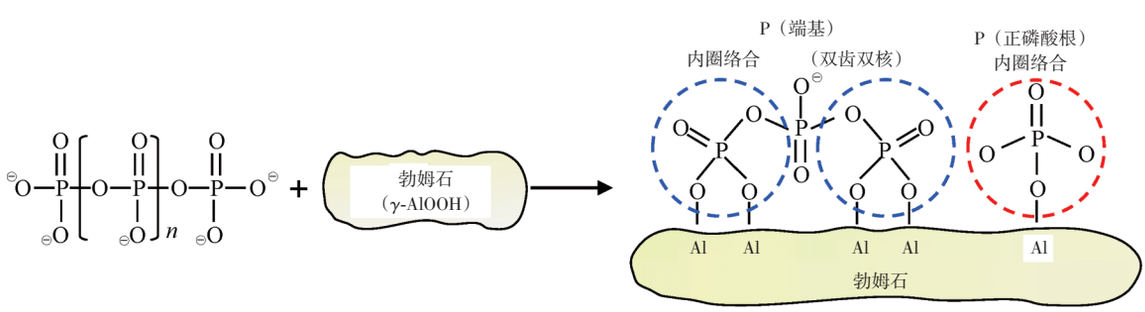


图3　PolyP在勃姆石表面吸附、水解机制[26]

Fig. 3　Microscopic mechanism of PolyP adsorption and hydrolysis on boehmite surface

2.2　水解途径与产物

PolyP的水解并非一步完成，而是分步进行，不同条件下的水解产物也各不相同，但总体趋势是向正磷酸盐转化。对于PolyP（n>3），其水解可以通过不同的途径发生，包括末端和中间磷酸酐键的断裂[20]。由于不同化学环境下的磷原子在核磁共振波谱图会表现出不同的化学位移，因此常用^{31}P-NMR技术来追踪水解过程中磷的形态变化，从而揭示水解机制[27-28]。

比如，Wan等[29]和HUANG等[20]的报道指出，PolyP水解的主要机制涉及末端磷酸基团的逐个断裂（见图4a.）。类似的，Zinder等[30]提出三聚磷酸盐的水解包含两个步骤：第一步是线性链的水解，产生焦磷酸根和正磷酸根；第二步是焦磷酸根进一步水解为2个正磷酸根。然而，Yan等[31]的研究提出Zn^{2+}使高聚合度的PolyP水解机制发生变化，从末端断链转变为中间断链或多种途径共存，这影响了正磷酸盐的释放（见图4b.）。PolyP水解的分子机制涉及质子化、亲核进攻和金属离子络合等过程。在酸性条件下，磷酸基团上的氧原子易被质子化，形成更易离去的离去基团，并活化P—O—P键，为水分子或羟基离子的亲核进攻创造条件[32]。在磷酸酶催化过程中，金属离子（如Zn^{2+}、Ca^{2+}、Fe^{2+}、Mn^{2+}）能够与PolyP的末端磷酸基团形成稳定络合物，通过Lewis酸活化作用，促进P—O—P键的断裂[33]。

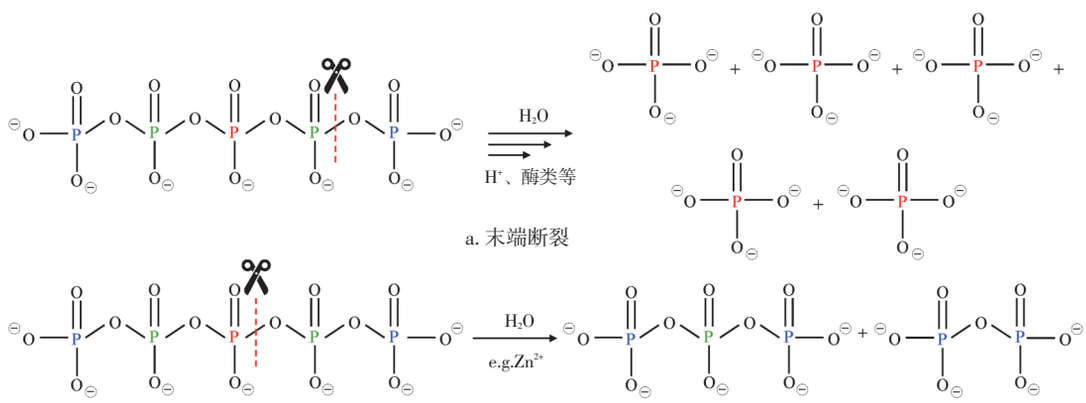


图4　PolyP的水解途径和产物

Fig. 4　Processes and products for hydrolysis of PolyP

3　影响PolyP水解的关键因素

PolyP在环境中的水解速率受到多种因素的共同调控，这些因素可归纳为环境因子和PolyP的内在性质两类（见图5）。

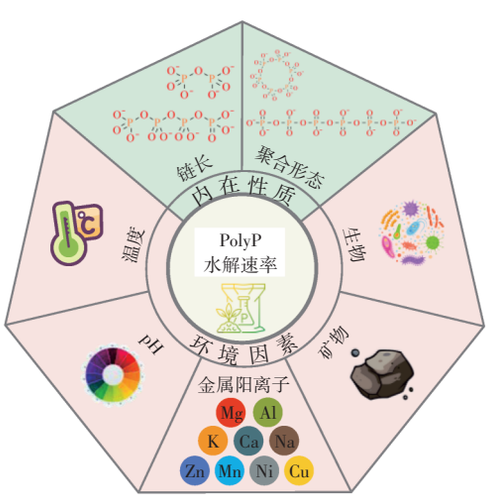


图5　影响PolyP水解的关键因素

Fig. 5　Key factors influencing PolyP hydrolysis

3.1　环境因素

影响PolyP水解的环境因素主要包括pH、温度、金属阳离子、矿物与生物。

3.1.1　pH

pH是影响PolyP水解速率的最重要环境因素之一。研究普遍表明，酸性条件有利于PolyP的水解，而在碱性条件下PolyP趋于稳定[25,34-35]。Zhou等[25]发现在pH 4～7时，多聚磷酸铵的水解速率随着pH升高显著下降；在pH 10条件下，多聚磷酸铵几乎不发生水解。其机制在于，酸性环境促进了P—O—P键的质子化，降低了活化能，使得水分子或羟基离子的亲核进攻更容易发生[36]。此外，pH还会影响酶的活性和金属离子的形态，从而间接影响PolyP的水解。

3.1.2　温度

温度对PolyP的水解速率具有显著影响。温度升高通常会加速PolyP的水解，因为更高的温度增加了反应体系中活化分子的数量，提高了分子碰撞

频率，从而加快了化学反应速率[32]。PolyP中P—O—P键的断裂需要一定的活化能，温度每升高5 ℃，化学反应速率可能增加约1倍[37]。多项研究证实了温度对PolyP水解的影响：Hons等[38]发现在5～35 ℃范围内土壤中PolyP水解速率随温度升高而显著增加；Mcbeath等[35]报道三聚磷酸盐在50 ℃下的水解常数为9.21×10^{-7} s^{-1}（半衰期20 d），而在4 ℃时水解显著减弱，常数难以测定；WANG等[36]发现水环境中PolyP在35 ℃下的水解速率是25 ℃的2.7倍，土壤环境中PolyP在35 ℃下的水解速率是25 ℃的1.12倍；Williard等[39]对比了焦磷酸铵、三聚磷酸铵和四聚磷酸铵在25、50 ℃下的水解，得出了同样的结论，即水解速率会随着温度的升高而增大。此外，温度升高也可能增加磷酸酶的活性，进一步加速酶促水解。

3.1.3 金属阳离子

环境中存在的金属阳离子对PolyP水解的影响机制复杂且多样，主要体现在：（1）金属阳离子可与PolyP链上的磷酸基团形成络合物，改变PolyP的构象和分子结构，进而影响其水解动力学[40]，例如Ni^{2+}在特定条件下可稳定P—O—P键，抑制PolyP的水解；（2）某些金属阳离子，特别是二价与三价的阳离子（如Mg^{2+}、Ca^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+}、Mn^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}）能够作为Lewis酸，活化P—O—P键，显著催化PolyP的水解[9,16,41]，其催化效率与阳离子的电荷、半径及与磷酸根的配位能力密切相关[16,41]。不同金属离子的催化/抑制效率存在差异，这跟各金属离子与PolyP的内在亲和力有关[42]。通常，金属阳离子对PolyP的稳定常数顺序与其催化活性相关[41]。此外，金属离子的影响也可能受PolyP的聚合形态（线性或环状）和pH的影响[16,43]。

3.1.4 矿物

土壤和沉积物中的矿物质，特别是金属氧化物（如铝、铁、锰的氧化物/氢氧化物），对PolyP的水解起着关键的催化作用[44]。PolyP能够吸附在矿物表面，形成稳定的表面络合物[35, 37]。矿物表面提供了丰富的活性位点，能够增强PolyP的吸附并促进P—O—P键的活化和水解。研究表明，与水相中的PolyP相比，吸附在矿物表面的PolyP水解速率更快[45]。矿物的催化效率与其表面性质密切相关，包括比表面积、表面电荷、晶体结构、粒径和官能团等。无定形的MnO_2或具有较高比表面积的铁氧化物（如纤铁矿）通常表现出更强的催化活性[29,46–47]。矿物表面的催化作用在存在特定金属阳离子（如Ca^{2+}和Mg^{2+}）时会进一步增强[29,48]。

3.1.5 生物

生物活动在PolyP水解中扮演着至关重要的角色。一方面，植物和微生物产生的磷酸酶能够极大地加速PolyP的水解[21,49]，这些酶通过降低反应的活化能，可将PolyP水解速率提高数个数量级；另一方面，微生物和植物根系分泌的有机酸（如柠檬酸、乙酸、乳酸、草酸等）也能显著促进PolyP的水解，通过提供质子或与PolyP形成络合物来实现[50–51]。例如，草酸和柠檬酸已被证实能有效促进PolyP释放磷[52]。

3.2 PolyP的内在性质

除环境相关因素外，PolyP的水解速率同时受自身特性的影响，其中分子链长和聚合形态（环状或线性）为其核心影响因素[21]。通常认为，短链PolyP的水解速率相对较慢，而长链PolyP的水解速率更快[32,38]。然而，在特定吸附基质（如方解石）上，长链和短链PolyP的水解行为可能存在差异，例如长链PolyP的水解受到促进，而短链PolyP受到抑制[53]。此外，线性PolyP通常比环状PolyP更容易发生水解[44]。环状结构需要先转化为线性形式，才能有效进行水解反应。研究表明，环状三聚磷酸盐和四聚磷酸盐的吸附和水解均少于其线性对应物[54]。

4 结论与展望

本文系统梳理了环境中PolyP水解的研究进展。研究表明，PolyP的水解是多重因素共同作用的复杂过程。PolyP的水解主要通过磷水解酶介导、有机酸催化和矿物催化等途径实现。水解过程涉及末端或中间磷酸酐键的断裂，释放出正磷酸盐。PolyP的水解速率受到环境因素（pH、温度、金属阳离子、矿物、生物因素）和PolyP自身性质（分子链长、聚合形态）的显著影响。酸性环境、高温、特定金属阳离子、金属氧化物矿物以及磷水解酶和有机酸均能促进PolyP的水解，而PolyP的链长和聚合形态也对其水解行为产生调控作用。

尽管目前对PolyP的水解研究已取得显著进展，但仍存在一些亟待深入探讨的方向：（1）探究分子层面的水解机制，当前研究多集中于单一因素或双元体系的影响，未来应加强对多因素耦合体系（如矿物–金属离子–PolyP三元体系）中PolyP水解转化机制的深入研究；（2）着力于模拟真实环境，开展多种耦合因素对PolyP水解的综合性评估，例如比较非生物因素和生物因素在不同环境条件下对

PolyP转化的相对贡献，以更全面地理解PolyP在复杂环境中的归趋及其生态环境效应；（3）结合PolyP水解的认知，探索更有效的PolyP污染控制和磷资源回收技术。

［参考文献］

［1］ Paytan A, Mclaughlin K. The Oceanic Phosphorus Cycle［J］. Chemical Reviews, 2007,107(2):563-576.

［2］ 圣丹丹. 针铁矿吸附多聚磷酸盐的研究:溶解有机质的影响［D］. 合肥:安徽建筑大学,2016.
Sheng Dandan. Study on the Adsorption of Polyphosphate by Goethite: The Effect of Dissolved Organic Matter［D］. Hefei: Anhui University of Architecture,2016.

［3］ Diaz J M, Ingall E D. Fluorometric Quantification of Natural Inorganic Polyphosphate［J］. Environmental Science & Technology, 2010, 44(12):4665-4671.

［4］ Rao N N, Gómez-garcía M R, Kornberg A. Inorganic Polyphosphate: Essential for Growth and Survival［J］. Annual Review of Biochemistry, 2009, 78(1):605-647.

［5］ Kulakovskaya T V, Vagabov V M, Kulaev I S. Inorganic polyphosphate in industry, agriculture and medicine: Modern state and outlook［J］. Process Biochemistry, 2011, 47(1):1-10.

［6］ Dick R P, Tabatabai M A. Polyphosphates as sources of phosphorus for plants［J］. Fertilizer Research, 1987, 12(2):107-118.

［7］ 王梦梦, 龚正文, 陈成, 等. 湖泊蓝藻多聚磷酸盐代谢机制及功能［J］. 湖泊科学, 2023, 35(3):780-794.
Wang Mengmeng, Gong Zhengwen, Chen Cheng, et al. Metabolic mechanism and function of cyanobacterial polyphosphate in lakes［J］. Journal of Lakes Sciences, 2023, 35(3):780-794.

［8］ Liu Liyuan, Zheng Xiangqun, Wei Xiaocheng, et al. Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication［J］. Scientific Reports, 2021, 11(1):23015.

［9］ Dürr-mayer T, Qiu D, Eisenbeis V B, et al. The chemistry of branched condensed phosphates［J］. Nature Communications, 2021, 12(1):5368.

［10］ Michelmore A, Gong W Q, Jenkins R, et al. The interaction of linear Polyphosphates with titanium dioxide surfaces［J］. Physical Chemistry Chemical Physics, 2000, 2(13):2985-2992.

［11］ Xie L H, Ursula U. Inorganic polyphosphate, a multifunctional polyanionic protein scaffold［J］. The Journal of Biological Chemistry, 2019, 294(6):2180-2190.

［12］ Gowariker V, Krishnamurthy V N, Gowariker S, et al. The Fertilizer Encyclopedia［M］. Hoboken: Wiley, 2009.

［13］ Lemos J W J F, Santinello D, Mohammadzadeh S, et al. Polyphosphate in food systems: Their roles and applications in foods and contribution to sustainable processing practices［J］. Trends in Food Science & Technology, 2024, 152:104696.

［14］ Demling P, Baier M, Deitert A, et al. Biotechnological polyphosphate as an opportunity to contribute to the circularization of the phosphate economy［J］. Current Opinion in Biotechnology, 2024, 87:103107.

［15］ 胡源, 彭伟, 黄咸钢, 等. 高聚物中添加含磷阻燃剂的技术［J］. 武汉大学学报(理学版), 2009,55(3):283-288.
Hu Yuan, Peng Wei, Huang Xiangang, et al. Technology of Adding Phosphorus-Containing Flame Retardants in Polymers［J］. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2009,55(3):283-288.

［16］ Rashchi F, Finch J A. Polyphosphates: A review their chemistry and application with particular reference to mineral processing［J］. Minerals Engineering, 2000,13(10-11):1019-1035.

［17］ Nguyen C T, Saito K. Role of Cell Wall Polyphosphates in Phosphorus Transfer at the Arbuscular Interface in Mycorrhizas［J］. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:725939.

［18］ Müller W E G, Schröder H C, Wang X H. Inorganic Polyphosphates As Storage for and Generator of Metabolic Energy in the Extracellular Matrix［J］. Chemical Reviews, 2019, 119(24):12337-12374.

［19］ Whitehead M P, Eagles L W, Hooley P, et al. Most bacteria synthesize polyphosphate by unknown mechanisms.［J］. Microbiology, 2014, 160 (Pt 5):829-831.

［20］ Huang R X, Wan B, Hultz M, et al. Phosphatase-Mediated Hydrolysis of Linear Polyphosphates［J］. Environmental Science & Technology, 2018, 52(3):1183-1190.

［21］ Khourchi S, Delaplace P, Bargaz A. Polyphosphate fertilizer use efficiency strongly relies on soil physicochemical properties and root-microbial activities［J］. Geoderma, 2023, 429:116281.

［22］ Ji Lingmei, Ren Genkuan, Xu Dehua, et al. Selective adsorption of various phosphorus species coexistence in water-soluble ammonium polyphosphate on goethite: Experimental investigation and molecular dynamics simulation［J］. Chemosphere, 2022, 307(P2):135901.

［23］ Guan X H, Liu Q, Chen G H, et al. Surface complexation of condensed phosphate to aluminum hydroxide: An ATR-FTIR spectroscopic investigation［J］. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 289(2):319-327.

［24］ Hamilton J G, Grosskleg J, Hilger D, et al. Chemical speciation and fate of tripolyphosphate after application to a calcareous soil［J］. Geochemical Transactions, 2018, 19(1):1.

［25］ Zhou Rongwei, Zhou Jian, Jia Lulu, et al. Polyphosphate hydrolysis, sorption, and conversion in two different soils［J］. European Journal of Soil Science, 2023, 74(1):e13341.

［26］ 李咏芳, 任超, 周强, 等. 多聚磷酸盐在羟基氢氧化铝矿物表面的吸附:基于^{31}P固体核磁共振技术的机制研究［J］. 高校地质学报, 2021, 27(4):385-393.
LI Yongfang, Ren Chao, Zhou Qiang, et al.Mechanism of Poly-phosphates Sorption by Boehmite: A ^{31}P Solid-state NMR Study［J］.Geological Journal of China Universities,2021,27(4):385-393.

［27］ Ran Xueling, Tejaswi uppuluri N S, Deng Yun, et al. Phosphorus bioavailability and recycling potential in various organic waste: Assessment by enzymatic hydrolysis and ^{31}P NMR［J］. Bioresource Technology, 2025, 416:131790.

［28］ Kim J, Li W, Philips B L, et al. Phosphate adsorption on the iron oxyhydroxides goethite (α-FeOOH), akaganeite (β-FeOOH), and lepidocrocite (γ-FeOOH): a ^{31}P NMR study［J］. Energy and Environmental Science:EES, 2011, 4(10):4298-4305.

［29］ Wan Biao, Yang Peng, Jung H, et al. Iron oxides catalyze the

hydrolysis of polyphosphate and precipitation of calcium phosphate minerals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 305:49-65.

[30] Zinder B, Hertz J, Oswald H R. Kinetic studies on the hydrolysis of sodium tripolyphosphate in sterile solution [J]. Water Research, 1984, 18:509-512.

[31] Yan Zhengjuan, Wang Yan, Xu Dehua, et al. Hydrolysis Mechanism of Water-Soluble Ammonium Polyphosphate Affected by Zinc Ions[J]. ACS Omega, 2023, 8(20):17573-17582.

[32] De Jager H, Heyns A M. Kinetics of Acid-Catalyzed Hydrolysis of a Polyphosphate in Water [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 1998, 102:2838-2841.

[33] Williams N H, Takasaki B K, Wall M J, et al. Structure and Nuclease Activity of Simple Dinuclear Metal Complexes: Quantitative Dissection of the Role of Metal Ions[J]. Accounts of Chemical Research, 1999,32(6):485-493.

[34] Barth A, Tormena C, Viotto W. pH influences hydrolysis of sodium polyphosphate in dairy matrices and the structure of processed cheese[J]. Journal Dairy Science, 2017, 100(11): 8735-8743.

[35] Mcbeath T M, Lombi E, Mclaughlin M J, et al. Polyphosphate-fertilizer solution stability with time, temperature, and pH [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(3):387-391.

[36] Wang Xuewei, Gao Yanju, Hu Baowei, et al. Comparison of the hydrolysis characteristics of three polyphosphates and their effects on soil phosphorus and micronutrient availability[J]. Soil Use and Management, 2019, 35(4):664-674.

[37] 王蕾, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 聚磷酸铵水解因素研究进展及在肥料中的应用[J]. 磷肥与复肥, 2015,30(4):25-27.
Wang Lei, Deng Lansheng, Tu Panfeng, et al. Research progresses of hydrolysis factors of ammonium polyphosphate and its application in fertilize [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015,30(4):25-28.

[38] Hons F M, Stewart W M, Hossner L R. Factor Interactions and Their Influence on Hydrolysis of Condensed Phosphates in Soils [J]. Soil Science, 1986, 141:408-416.

[39] Williard J W, Farr T D, Hatfield J D. Hydrolysis of ammonium pyro-, tripoly-, and tetrapolyphosphate at 25.deg. and 50.deg. [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1975, 20(3): 276-283.

[40] Utyanskaya E Z, Lidskii B V. Influence of Additional Metal Ions on the Ratio of Conversion Rates of Intermediate Products of the Hydrolysis of Adenosine-5'-Triphosphoric Acid Catalyzed by the Cu^{2+} Ion: 1. Experimental Study of the Influence of Mg^{2+} Ions in the Ascending Branch of the Dependence of the Initial Hydrolysis Rate on pH[J]. Russian Journal of Physical Chemistry: B,2012, 6(5):601-612.

[41] Park Y, Malliakas C D, Zhou Q, et al. Molecular Coordination, Structure, and Stability of Metal-Polyphosphate Complexes Resolved by Molecular Modeling and X-ray Scattering: Structural Insights on the Biological Fate of Polyphosphate [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55 (20): 14185-14193.

[42] Maki H, Tsujito M, Sakurai M, et al. Stabilities of the Divalent Metal Ion Complexes of a Short-Chain Polyphosphate Anion and Its Imino Derivative[J]. Journal of Solution Chemistry, 2013, 42 (11):2104-2118.

[43] Hansen-bruhn I, Laura Craig J, Hinge M, et al. Ammonium polyphosphates: Correlating structure to application [J]. European Polymer Journal, 2025, 223:113644.

[44] Torres-dorante L O, Claassen N, Steingrobe B, et al. Hydrolysis rates of inorganic polyphosphates in aqueous solution as well as in soils and effects on P availability [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(3):352-358.

[45] Hamilton J G, Hilger D, Peak D. Mechanisms of tripolyphosphate adsorption and hydrolysis on goethite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 491:190-198.

[46] Wan B, Huang R X, Diaz J M, et al. Polyphosphate Adsorption and Hydrolysis on Aluminum Oxides[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(16):169542-169552.

[47] Wan B, Huang R X, Diaz J M, et al. Manganese Oxide Catalyzed Hydrolysis of Polyphosphates[J]. American Chemical Society, 2019, 3(11):2623-2634.

[48] Inman M P, Beattie J K, Jones D R, et al. Abiotic hydrolysis of the detergent builder tripolyphosphate by hydrous manganese dioxide[J]. Water Research, 2001,35(8):1987-1993.

[49] Khourchi S, Elhaissoufi W, Loum M, et al. Phosphate solubilizing bacteria can significantly contribute to enhance P availability from polyphosphates and their use efficiency in wheat [J]. Microbiological Research, 2022, 262:127094.

[50] Bakri M M. Tri-Calcium and Zinc Phosphates Solubilization by Aspergillus Niger and Its Relation to Organic Acids Production [J]. BioNanoScience, 2019, 9(2):238-244.

[51] Rezakhani L, Motesharezadeh B, Tehrani M M, et al. Phosphate-solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (Triticum aestivum L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 173:504-513.

[52] Darch T, Blackwell M S A, Chadwick D, et al. Assessment of bioavailable organic phosphorus in tropical forest soils by organic acid extraction and phosphatase hydrolysis [J]. Geoderma, 2016, 284:93-102.

[53] Ji Lingmei, Yuan Haibin, Xu Dehua, et al. Precipitation and hydrolysis of water-soluble ammonium polyphosphate on calcite surface depend on the number of P species [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 656:130331.

[54] Shahandeh H, Hossner L R, Trostle C. Linear and Cyclophosphates as Sources of Phosphorus for Corn [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39 (7-8):1090-1104.