



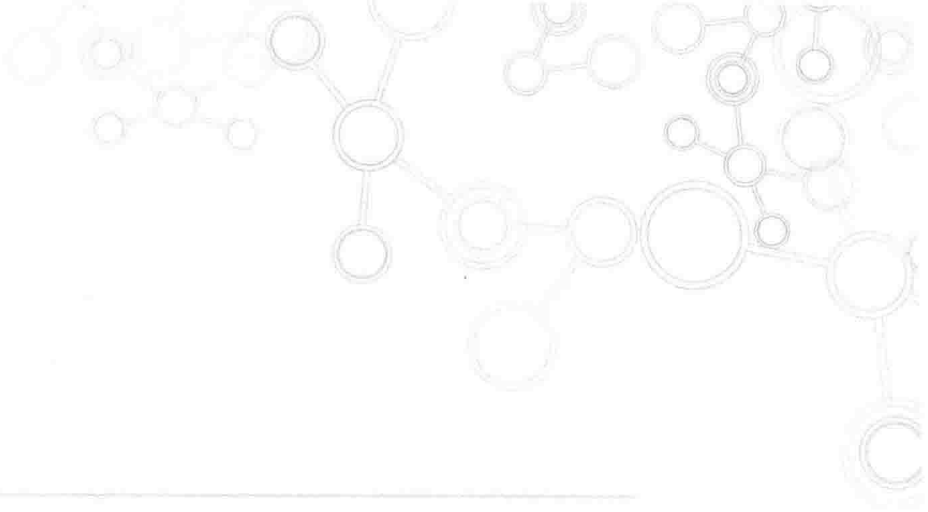
地球磷资源流 与肥料跨界融合

许秀成 侯翠红 主编

DIQIU LINZIYUANLIU
YU FEILIAO KUAJIE RONGHE



化学工业出版社



地球磷资源流 与肥料跨界融合

许秀成 侯翠红 主编

贵州师范学院内部使用



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书围绕“全球磷资源开采寿命有多久?如何永续利用全球磷资源?”这一热点问题展开,系统分析了地球磷的来源及赋存形态、地球磷资源的形成及流向,梳理和总结了我国磷矿开采、磷化工生产、磷肥产品生产及磷肥农业使用过程的经验及存在问题,论述了肥料领域颠覆性创新理论及肥料跨界融合创新理念,并提出了磷资源可持续发展利用的新模式,既是一部反映我国磷资源来龙去脉的著作,也是一部启迪青年创新能力的读本。

本书可供涉磷企业及决策机构、行业协会、大中型肥料企业技术人员阅读,也可供大专院校肥料等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球磷资源流与肥料跨界融合/许秀成,侯翠红主编. —北京:化学工业出版社,2019.10

ISBN 978-7-122-35028-2

I. ①地… II. ①许… ②侯… III. ①磷-化学工业-研究-中国 ②磷肥-化肥工业-研究-中国 IV. ①F426.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第165048号

责任编辑:刘军 张艳

文字编辑:赵爱萍

责任校对:刘颖

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:中煤(北京)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张17½ 彩插1 字数424千字 2020年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:128.00元

版权所有 违者必究



图 3-1 考察昆明地区震旦系及寒武系含磷岩层，磷矿中生命大爆发的轨迹



图 10-12 考察云南磷化集团露天开采磷矿剥离层黑色半风化黏土页岩及重介质选矿场



图 11-3 考察以色列 Agroweblab 智慧农业试验田



图 11-5 近地 γ 射线感应测土车 (车前端圆柱体为铯 γ 射线感应器)

富地研究所智库学术委员会

《地球磷资源流与肥料跨界融合》 编审委员会

主任：金 涌

委员：金 涌	中国工程院院士	清华大学教授
刘炯天	中国工程院院士	郑州大学教授
赵玉芬	中国科学院院士	厦门大学教授
黎乐民	中国科学院院士	北京大学教授
谢联辉	中国科学院院士	福建农林大学教授
张福锁	中国工程院院士	中国农业大学教授
赵秉强	中国农业科学院	研究员
许秀成	郑州大学	教授
侯翠红	郑州大学	教授

本书编写人员名单

主 编：许秀成 侯翠红

编写人员：许秀成 郑州大学

侯翠红 郑州大学

李英翔 云天化股份有限公司

李耀基 云天化股份有限公司

师永林 云天化股份有限公司

苗俊艳 郑州富谊联科技有限公司

王艳语 郑州富谊联科技有限公司

修学峰 中国磷复肥工业协会

胡 敏 中国磷复肥工业协会

张卫峰 中国农业大学

袁俊宏 中国化学矿业协会

邢光熹 中国科学院南京土壤研究所

王慎强 中国科学院南京土壤研究所

汪 玉 中国科学院南京土壤研究所

前言

本书是一本特殊的出版物。它作为“郑州大学-云天化-富谊联”面对全球的肥料智库——富地研究所（Fertilizer Development Institute）的第一本智库研究报告，由我国化工领域专业科技出版社——化学工业出版社公开出版发行，这是一次新的尝试。本书的风格、内容都与一般的科技图书有所不同。

智库（Think tank）也称思想库。“智库”集中一群“智者”就某一专题为决策者提供科学、客观、公正而全面的决策建议。智库的英文名称也可译为“思想坦克”，美国知名智库兰德公司（RAND Construction Company，RAND 是 Research And Development 研究与开发的缩写）是美国最重要的以军事为主的综合性战略研究机构。公司性质是非营利的民办研究机构，它虽然是一家民营企业，但它注册的经营范围却涉及政治、军事、经济、科技和社会。美国兰德公司确实是一辆巨大的思想坦克。自 1948 年成立以来，先后汇集了 800 位“智者”的研究成果，在很大程度上影响和左右着美国的政治、经济、军事和外交等一系列重大事务的决策。兰德公司成功地预测了“中美建交”和“德国统一”，也对“中国 21 世纪的空军”“中国的汽车工业”“日本的高科技”“俄罗斯的核力量”“数字化战场上美国快速反应部队”等重大课题形成过研究报告。

富地研究所（Fertilizer Development Institute）是专注研究全球肥料领域的智库，为关系到全球粮食安全、合理利用资源、人类健康的肥料问题提供宏观决策支持性质的建议。智库的使命是为政府、协会、企业的决策者和执行者提供建议；它不是纯粹的学术探讨，而是将学术探讨中得出的结论，转化为有可操作性的建议；智库不是咨询公司，它既解决当前应急的课题，但更重要的是开展长期的战略研究。智库肩负着如此重大的使命！为完成本研究报告，我们系统收集和整理了 181 篇参考文献，其中，中文 135 篇，英文和日文 46 篇；涉及 92 家国内外高校、企业，其中，国内 59 个、国外 33 个；涉及国内外与研究报告相关的专家 110 人，其中国内 87 位，国外 23 位。他们大多是在所涉领域做出了贡献的人物。本研究报告力求能提供科学、宏观、全面的决策建议，这与一般专著的风格不同。

本智库研究报告选择一个国家热点问题——全球磷资源开采寿命有多久？如何永续利用全球磷资源？（提出问题）；分析地球磷来自何方？地壳中有多少磷？地球磷资源流向何方？（分析地球磷的“来龙去脉”）；介绍中国磷矿开采过程、磷化工生产过程、磷肥产品生产过程、磷肥农业使用过程的经验及存在的问题。分析磷在社会性消费流程中的效率，指出解决问题的途径（解决问题、提出建

议)。通常,智库研究报告通过提出问题、分析问题和解决问题,浓缩为一两万字的研究报告,提供给决策方参考。但为了完成研究报告需要10~20倍篇幅的基础资料作为背景材料,这些背景材料构成了本书的主要内容。

本研究报告的构成为:智库研究报告中文本、英文本,作为背景资料的专著,共计12章。第1章:地球磷来自何方?介绍宇宙的发生与发展,属于天文知识。第2章:地壳中磷的赋存形态。第3章:地球磷资源的形成。第4章:地球中的磷流向何方,属于地理知识。第5章:中国磷资源及其流向至第10章:如何永续利用地壳中的磷?为“人间”状态。创新科学工作者应该上知“天”,下知“地”,更应知“人间”。这样有助于更深层次认识自己的研究领域,并可能诱发出相关研究领域的颠覆性创新。第11章:肥料领域颠覆性创新理论。第12章:肥料跨界融合创新,为肥料领域各级决策者提供更新的创新观念。对于肥料企业,相关高校和设计研究机构有大批的中青年技术骨干,在此创新大潮中,他(她)们发挥着承上启下的作用,提高广大中青年科技人才的创新素质是当前相关企业、高校、设计研究部门的迫切任务。

当今,科学技术日新月异,创新发明层出不穷。决策者除需掌握科学的决策方法,从决策者个人的经验决策到委托专业人士进行可行性研究(也称孤立决策),委托专职机构进行系统决策(宏观、微观决策支持系统决策)外,还必须紧跟时代发展步伐,更新创新观念。2015年的创新观念强调“颠覆性”创新;2017年强调“引领性”创新;2018年强调“跨界融合”创新。这种快速变化,绝不是炒概念,而是我们科技进步快速发展的要求。正因为我国科技队伍的万马奔腾,促使我国科技口号日新月异。

本书得到了国家“十三五”重点研发计划“作物专用高效复混肥料的研制与产业化”(2016YFD0200401)课题的资助,特此致谢!

本书非常适合全球涉磷企业、行业协会、国内涉磷决策机构及企业、大中型肥料企业技术人员及高校师生参考,在帮助企业通过颠覆性技术创新、跨界融合创新,走出困境的同时,为全球磷资源永续利用提供决策参考。

许秀成 侯翠红

2019年5月

目 录

智库磷研究报告	001
The Think Tank Report on Phosphorus	012
绪论	030

第 1 章 地球磷来自何方 / 033

1.1 宇宙大爆炸	033
1.2 宇宙的前世今生	033
1.2.1 宇宙未来的 4 种推测	034
1.2.2 宇宙前世的 4 种推测	034
1.2.3 宇宙同源	035
1.3 磷素的来源	037
参考文献	039

第 2 章 地壳中磷的赋存状态 / 041

2.1 地球基本知识	041
2.2 磷在地壳中的分布	045
参考文献	046

第 3 章 地球磷资源的形成 / 048

3.1 磷质来源	048
3.2 磷矿资源基本知识	049
3.3 世界磷矿资源	050
3.3.1 磷矿资源量	050
3.3.2 磷矿资源分布	051
3.3.3 磷矿开采量	052
3.3.4 磷矿资源品位	053

3.4 世界磷矿开采寿命预测	054
参考文献	055

第4章 地球中的磷流向何方? / 056

4.1 地球磷循环的基本过程	056
4.2 地球陆地和水生生态系统的磷流量	058
4.3 全球磷资源的流向	059
参考文献	063

第5章 中国磷资源及其流向 / 064

5.1 中国磷资源的成因	064
5.2 中国磷资源储量	065
5.3 中国磷资源在食物链中的流动	066
5.4 中国磷矿可开采多久?	069
参考文献	071

第6章 磷矿开采过程 / 073

6.1 磷矿开采	073
6.1.1 磷矿开采方式	073
6.1.2 中国磷矿主要开采技术与特点	075
6.2 磷矿选矿技术	077
6.2.1 选矿工艺	078
6.2.2 选矿药剂	080
6.2.3 选矿设备	081
6.2.4 选矿尾矿	082
6.2.5 选矿损失	083
6.3 中国磷矿开发利用的主要特点	084
6.4 在磷矿开采方面中国开展的几项工作	085
6.4.1 全国磷资源开发系统研究	085
6.4.2 中国科学院学部咨询评议项目《我国磷科技发展关键问题与对策》	086
6.4.3 郑州工学院、郑州大学开展的工作	088
参考文献	088

第7章 磷化工产品生产过程 / 090

7.1 磷的理化性质	090
------------------	-----

7.2	磷化工产品	091
7.3	黄磷生产基本知识	092
7.3.1	黄磷生产方法	092
7.3.2	黄磷生产赤磷、黑磷	092
7.3.3	黄磷生产有机磷化物	093
7.3.4	黄磷生产热法磷酸	094
7.4	黄磷生产现状	094
7.5	黄磷“三废”处理与综合利用	095
7.5.1	黄磷尾气	095
7.5.2	黄磷废水	098
7.5.3	黄磷废渣	098
7.6	主要工业级磷酸盐产品	099
7.6.1	三聚磷酸钠和六偏磷酸钠	099
7.6.2	电子级磷酸、食品级磷酸	100
7.6.3	工业级磷酸一铵、磷酸二氢钾	100
7.7	世界磷化工行业发展特点	101
7.8	中国磷化工行业发展特点	101
	参考文献	102

第8章 磷肥产品生产过程 / 103

8.1	湿法磷酸	104
8.1.1	湿法磷酸生产的基本原理	104
8.1.2	湿法磷酸生产方法	105
8.1.3	中国五环工程有限公司在湿法磷酸建设工程中取得的卓越成绩 ...	107
8.1.4	湿法磷酸净化	112
8.2	磷酸铵类肥料	114
8.2.1	磷酸铵类肥料基本知识	114
8.2.2	磷酸一铵（四川大学研究成果）	114
8.2.3	磷酸二铵	118
8.3	过磷酸钙	120
8.3.1	普钙、重钙、富钙与半钙	120
8.3.2	普钙生产工艺流程	121
8.4	重过磷酸钙	124
8.4.1	重钙生产的基本原理	124
8.4.2	重钙生产对原料的要求	125
8.4.3	重钙生产工艺流程	126
8.5	硝酸磷肥	127
8.5.1	硝酸分解磷矿制硝酸磷肥的基本原理	127
8.5.2	硝酸磷肥生产工艺	128

8.5.3	硝酸磷肥的肥效	134
8.5.4	硝酸磷肥与其他产品的比较	135
8.6	钙镁磷肥	136
8.6.1	钙镁磷肥基本知识	136
8.6.2	中国创新：钙镁磷肥“玻璃结构因子”配料方法	138
8.7	脲硫酸复肥	143
8.7.1	脲硫酸复肥工艺的开发	143
8.7.2	脲硫酸复肥工艺原理	144
8.7.3	脲硫酸功能性复肥的工艺路线及特点	145
8.7.4	脲硫酸复肥的应用效果	146
8.7.5	磷铵厂、过磷酸钙厂新增功能性脲硫酸复肥装置的经济分析	146
8.8	无机材料反应成膜缓释复合肥料	147
8.8.1	包裹肥料的概念与范畴	147
8.8.2	包裹肥料的国内外研究进展	149
8.8.3	包裹肥料的加工原理与工艺	150
8.8.4	包裹肥料的特点	152
8.8.5	包裹肥料施用技术	153
8.8.6	包裹肥料施用效果	154
8.8.7	无机包裹型缓释复合肥料的节能减排效果	157
8.8.8	标准与检测	158
8.9	饲料级磷酸盐	158
8.9.1	饲料级磷酸氢钙基本知识	158
8.9.2	饲料级磷酸三钙（TCP）技术	159
8.10	磷肥生产“三废”处理与回收的基本状况	160
8.10.1	磷肥废气	160
8.10.2	磷肥废水	161
8.10.3	磷肥废渣	161
8.11	中国磷肥行业发展概况及未来发展方向	164
8.11.1	磷肥行业发展历程	164
8.11.2	产业集中度与产能分布	168
8.11.3	磷肥行业主要产品发展概况	169
8.12	磷肥工业发展	172
8.13	2016 年磷复肥行业运行特点	175
8.14	磷肥行业未来发展方向	176
8.15	中国磷复肥工业协会	177
8.16	《磷肥与复肥》杂志	178
	参考文献	179

第 9 章 磷肥农业使用过程 / 181

9.1	磷在肥料领域的作用与特点	181
-----	--------------------	-----

9.1.1	磷的作用	181
9.1.2	作物缺磷表现出的症状	182
9.2	磷肥消费量基本状况	184
9.3	中国磷资源消耗和环境影响	187
9.4	中国施肥合理的标准	188
9.4.1	养分平衡法	188
9.4.2	磷肥过量、合理与不足	190
9.4.3	磷合理施用与产量的关系	192
参考文献		195

第 10 章 如何永续利用地壳中的磷? / 196

10.1	基本状况	196
10.2	哪些因素影响磷矿基础储量的使用寿命?	197
10.3	影响磷资源消耗的因素	197
10.3.1	全球磷资源流动模型效率因子	197
10.3.2	全球磷资源永续利用敏感性分析	200
10.4	磷回收的工艺技术	201
10.4.1	AirPrex 磷回收工艺	201
10.4.2	Ostara Pearl 磷回收工艺	202
10.4.3	第二代磷回收工艺	202
10.4.4	生物-结晶法磷回收工艺	204
10.5	磷肥生产领域, 中国磷资源永续利用新模式	205
10.5.1	“郑州大学-云天化-富谊联”磷资源永续利用新模式	205
10.5.2	金正大生态工程集团股份有限公司磷化工清洁生产技术体系 ...	208
10.6	农学、化学、化工多学科联合, 探讨中国磷矿资源危机及缓解对策	210
10.6.1	调整磷肥产品结构, 合理利用中国的磷矿资源	211
10.6.2	磷资源循环利用	211
10.6.3	建立科学施磷制度	213
参考文献		216

第 11 章 肥料领域颠覆性创新理论 / 218

11.1	未来农业发展方向	218
11.1.1	精准农业	218
11.1.2	机器人与城市农业	221
11.1.3	植物工厂	221
11.1.4	基因工程、基因编辑与基因选择	223
11.1.5	蓝色经济	224
11.2	中国农业现状	225

11.3 肥料领域颠覆性创新理论	228
11.3.1 肥料领域颠覆性创新理论由来	228
11.3.2 肥料领域的概念创新	229
11.3.3 宇宙同源	230
参考文献	235

第 12 章 肥料跨界融合创新 / 236

12.1 肥料研究/发展方向	236
12.2 植物生长的“气”	237
12.2.1 “气”的认识	237
12.2.2 气血共振的奥秘	237
12.2.3 农用低温等离子体	238
12.3 植物生长的“血”	238
12.3.1 缓/控释肥料	238
12.3.2 小分子碳	241
12.4 植物的抗体	243
12.4.1 植物生物刺激素的概念与定义	243
12.4.2 生物刺激素——精细化学品的发展现状	245
12.5 增强作物光合作用的“气灌系统”	246
12.5.1 气灌的作用	246
12.5.2 气灌系统组成	247
12.6 利用微生物全面提升农产品质量和食品安全水平	247
12.6.1 微生物	247
12.6.2 国内外微生物的研究与发展动向	249
12.6.3 生物肥料在全球作物生产中的应用	251
12.7 基于分子生物学的精准供应最低量全面营养的均衡施肥	256
12.8 纳米、亚微米材料农用	257
12.8.1 纳米材料的特性	257
12.8.2 纳米材料的农业应用	258
参考文献	262

附录 / 263

附表 1 不同数据来源的中国与世界磷肥消费量年际变化	263
附表 2 单位籽粒需氮量指标	265
附表 3 单位产量磷和钾吸收量	265

智库磷研究报告

基于国际上对磷资源危机的争议，催生了本研究报告对地球磷资源流的探讨。本研究报告试图探讨“如何跨越全球磷危机？是否有永续利用地壳中磷的可能性？”

为使中国磷矿开采寿命可延至千年，由中国科学院赵玉芬院士组织了一系列高端研讨活动，具体如下。

(1) 中国科学院院士咨询评议项目：我国磷科技发展关键问题与对策（2009—2011年）。

(2) 中国科学院院士咨询评议项目：我国肥料使用中存在的问题及对策（2012—2014年）。

(3) 香山科学会议第 526 次学术讨论会：建立绿色肥料保障体系关键科学问题（2015年 5 月 6~8 日）。

(4) 中国科学院院士咨询评议项目：适应新农业需求，构建我国肥料领域创新体系（2015—2016 年）。

本报告收录了高端研讨学术观点；检视了宇宙的发展进程、探讨了地球中磷的来龙去脉；参加磷科学国际会议，获取了磷的宏观数据；请教了磷矿业、磷化工专家；调研了磷肥产业现状；请教了农业专家；跨界组织专家共同研讨如何永续利用地壳中的磷及跨界融合肥料领域颠覆性创新。

智库磷研究报告主要内容分为六部分，共 12 章。

第一部分：检视宇宙的发展过程

第 1 章 地球磷来自何方？

宇宙中³¹P 起源于恒星内部的物质燃烧爆炸（核聚变）。地球中的磷来自宇宙；地球上一切变化规律均遵循宇宙的变化规律。

第 2 章 地壳中磷的赋存状态

地壳中含有 $(2\sim3) \times 10^{16} \text{ t}$ 磷。绝大部分以含磷 0.1% 的浓度分散在花岗岩、玄武岩等火成岩中，地壳中的磷是高度分散的。

第 3 章 地球磷资源的形成

磷资源与地壳中总磷量是完全不同的概念。地壳中总磷量是地球继承了来自宇宙尘埃中的磷。而地球磷资源是人们能作为资源利用的磷。地壳中磷的含量平均为 0.1%，要使磷富集成为磷资源的工业矿体 $[\omega(\text{P}_2\text{O}_5) > 11\%, \omega(\text{P}) > 4.8\%]$ ，磷的含量要提高 50 倍以上。根据不同磷矿的地质条件，磷矿形成时的磷质来源，主要有三种学说：海底火山喷发作用带

来的磷（火山说），陆源吸收（陆壳说）和低等植物藻类的兴衰（生物说）。

由地幔喷出的岩浆，在冷却过程析出磷灰石结晶，成为岩浆岩型磷矿床，称为磷灰石；从岩浆喷发的磷灰石通过风化作用进入水体的磷，为水生生物食物链利用，形成生物富集的磷矿，这种由海相沉淀的磷矿称为磷块岩；部分属于沉积岩的磷块岩由于地壳运动沉入地壳下层，在地壳下层高温高压的作用下，磷块岩中细微含磷粒子的热运动，逐渐聚集为较粗的结晶，而类似火成岩的磷灰石，称为变质磷块岩。当前，全球磷矿开采量的85%为磷块岩；全球商品磷矿产量的15%来自磷灰石。

2017年，全球可商品化的磷矿基础储量为682亿吨。摩洛哥及西撒哈拉磷矿基础储量为500亿吨，占全球总量的73.3%；中国基础储量为33亿吨，虽然居全球第二位，但仅占全球基础储量的4.8%。

本研究报告估计：世界磷矿资源的平均品位约含 P_2O_5 18%，若按实物量3000亿吨估算，则其中含 P_2O_5 总量约540亿吨（ $5.4 \times 10^{10} t$ ），折合为磷元素约为 $2.36 \times 10^{10} t$ ，仅占地壳中总磷量（ $2 \sim 3$ ） $\times 10^{16} t$ 的百万分之一。即或今后勘探使世界磷矿资源量增至30000亿吨，全球磷资源也最多占地壳中总磷量的十万分之一。全球应该十分珍惜地表磷资源，确保磷资源永续利用。

第二部分：参加磷科学国际会议，获取了磷的宏观数据

第4章 地球中的磷流向何方？

自然界中磷循环的基本过程，包括陆地生态系统和水生生态系统。

（1）地球陆地生态系统、水生生态系统的总体磷流量

① 地球岩石圈含0.1%的磷，其中海洋和江湖沉积 4×10^7 亿吨磷，陆地磷矿沉积16亿~360亿吨磷或120亿~2700亿吨磷矿，海洋及淡水中沉积的磷为陆地沉积磷的 $1.1 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6$ 倍。

② 每年采掘陆地沉积磷矿1.4亿吨（与2006年世界磷矿产量1.43亿吨接近），制得1800万吨（以磷计）磷肥（相当于4123万吨 P_2O_5 ，与IFA统计2007年全球磷肥产量4022万吨 P_2O_5 相近）；每年有1000万吨磷来自有机肥，直接使用150万吨磷矿（相当于20万吨磷）。上述三部分合计每年有2820万吨磷进入耕作土壤磷库。

③ 在全球0~50cm土壤磷库中有500亿吨磷，其中全球耕作层土壤中有50亿~60亿吨磷，占全球土壤磷库总量的10%~12%。土壤耕作层总磷库中的磷相当于每年进入耕作层磷库磷177~213年的累积量。

④ 土壤耕作层磷库中，每年被全球生物吸收利用7000万~1亿吨磷，构成陆地生物物质中的磷。陆地生物物质磷总量为6亿吨，其中每年有5200万~2.87亿吨磷返回土壤磷库。

⑤ 土壤磷库中，每年有500万吨磷排入水体，还有2500万~3000万吨磷随土壤径流和侵蚀进入海水和淡水中。土壤磷库中有（300~400）万吨磷通过风力侵蚀和作物燃烧又返回土壤磷库中。

⑥ 海洋和淡水中有930亿吨磷，水生植物生物物质含（7000~7500）万吨磷。水中每年有2000万~3000万吨磷埋藏入海洋、江湖沉积层。通过地质的变迁和隆起，沉积物转变为含磷酸盐的矿物岩石一起被抬升至海平面以上，形成新一轮磷的循环。