

学校编码: 10384
学号: 33120141151686

分类号_____密级_____

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

运用毒代动力学-毒效动力学模型预测河口
水化学对光滑河蓝蛤铜毒性的影响

Understanding the effects of water chemistry on the toxicity
of copper in an estuarine clam *Potamocorbula laevis* using
the toxicokinetic-toxicodynamic model

陈雯倩

指导教师姓名: 谭巧国 副教授

专业名称: 环境科学

论文提交日期: 2017年4月

论文答辩日期: 2017年5月

2017年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 我国河口及近海环境中 Cu 污染概况.....	2
1.1.1 我国河口及近海海域中 Cu 的污染状况.....	2
1.1.2 我国河口及近海环境中双壳类动物受 Cu 污染概况.....	3
1.2 盐度对 Cu 生物累积和毒性的影响.....	5
1.2.1 河口水体盐度的变化情况（以九龙江口为例）.....	5
1.2.2 盐度对 Cu 生物累积的影响.....	6
1.2.3 建立适用于河口水体的 BLM.....	7
1.3 溶解性有机质对 Cu 生物累积和毒性的影响.....	8
1.3.1 溶解性有机质的来源组成及在水环境中的含量.....	8
1.3.2 溶解性有机质对 Cu 毒性的影响.....	9
1.4 研究目的、研究内容和技术路线.....	10
1.4.1 研究的意义和目的.....	10
1.4.2 研究生物和研究内容.....	10
1.4.3 技术路线.....	11
第二章 盐度对光滑河蓝蛤 Cu 生物累积和毒性的影响.....	13
2.1 引言.....	13
2.2 材料与方法.....	13
2.2.1 光滑河蓝蛤的采集及驯化.....	13
2.2.2 海水的采集及处理.....	14
2.2.3 Cu 的吸收排出.....	15
2.2.4 不同盐度条件下的毒性测试.....	16
2.2.5 蛤软组织及水样的金属含量测定.....	17
2.2.6 溶解性有机碳的测定.....	17

2.2.7 TK-TD 模型.....	18
2.2.8 统计分析	20
2.3 结果与讨论	20
2.3.1 Cu 的毒代动力学.....	20
2.3.2 盐度对 Cu 生物累积的影响.....	23
2.3.3 盐度对 Cu 毒效动力学的影响.....	26
2.4 结论	31
第三章 波动盐度对光滑河蓝蛤 Cu 生物累积和毒性的影响	32
3.1 引言	32
3.2 材料与方法	32
3.2.1 生物及实验海水的采集与处理	32
3.2.2 实验设计	33
3.2.3 波动盐度条件下 Cu 的累积.....	34
3.2.4 波动盐度的毒性测试	35
3.2.5 蛤软组织及水样的金属含量测定	36
3.2.6 模型及化学分析	36
3.3 结果与讨论	36
3.3.1 盐度连续波动对 Cu 毒代动力学的影响.....	36
3.3.2 盐度连续变化对 Cu 毒效动力学的影响.....	39
3.3.3 毒性测试中死亡的个体的 Cu 浓度.....	41
3.4 结论	43
第四章 溶解性有机碳对光滑河蓝蛤 Cu 生物累积和毒性的影响	44
4.1 引言	44
4.2 材料与方法	44
4.2.1 实验海水的配置	44
4.2.2 典型 DOC 浓度条件下的吸收排出	45
4.2.3 不同 DOC 浓度条件下的吸收排出	46
4.2.4 不同 DOC 浓度条件下的毒性测试.....	47

4.2.5 模型及化学分析	47
4.3 结果与讨论	48
4.3.1 低浓度 DOC 对 Cu 毒代动力学的影响	48
4.3.2 不同浓度 DOC 对毒代动力学的影响	50
4.3.3 DOC 对 Cu 毒效动力学的影响	52
4.4 结论	56
第五章 总结与展望	57
5.1 总结	57
5.1.1 盐度对 Cu 生物累积和毒性的影响	57
5.1.2 连续变化盐度对 Cu 生物累积和毒性的影响	57
5.1.3 DOC 对 Cu 生物累积和毒性的影响	58
5.2 创新点	58
5.3 展望	58
参考文献	60
附录	67
攻读硕士学位期间发表的论文	72
致谢	73

Contents

Chinese Abstract	I
English Abstract.....	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Copper pollution in estuarine and coastal waters of China	2
1.1.1 Current status of copper pollution	2
1.1.2 Copper contamination in estuarine and coastal bivalve molluscs	3
1.2 Effects of salinity on on bioaccumulation and toxicity of Cu	5
1.2.1 The fluctuation of salinity in estuaries (e.g., Jiulong River Estuary)	5
1.2.2 Effects of salinity on Cu bioaccumulation.....	6
1.2.3 Improving BLM for estuarine waters	7
1.3 Effects of Dissolved Organic Carbon (DOC) on the bioaccumulation and toxicity of Cu.....	8
1.3.1 Sources of DOC and its concentration in esturine waters	8
1.3.2 Effects of DOC on Cu toxicity.....	9
1.4 Research objectives, significance and contents.....	10
1.4.1 Research objectives and significance	10
1.4.2 Model organism and research contents.....	10
1.4.3 Research framework	11
Chapter 2 Effects of salinity on Cu toxicity in an estuarine clam	13
2.1 Introduction	13
2.2 Material and methods	13
2.2.1 Collection and acclimation of organisms.....	13
2.2.2 Collection and pretreatment of water samples.....	14
2.2.3 Cu uptake and elimination	15
2.2.4 Toxicity tests under different salinities	16
2.2.5 Metal analysis	17

2.2.6 DOC analysis	17
2.2.7 TK-TD model.....	18
2.2.8 Statistical analysis.....	20
2.3 Results and discussion.....	20
2.3.1 Cu toxicokinetics	20
2.3.2 Effects of salinity on Cu bioaccumulation.....	23
2.3.3 Cu toxicodynamics and the effects of salinity	26
2.4 Conclusion.....	31
Chapter 3 Effects of salinity fluctuation on bioaccumulation and toxicity of Cu in an estuarine clam	32
3.1 Introduction	32
3.2 Material and methods	32
3.2.1 Collection and pretreatment of samples.....	32
3.2.2 Experimental design	33
3.2.3 Cu bioaccumulation under salinity fluctuation.....	34
3.2.4 Toxicity tests under salinity fluctuation.....	35
3.2.5 Metal analysis	36
3.2.6 Statistical analysis.....	36
3.3 Results and discussion.....	36
3.3.1 Effects of salinity fluctuation on Cu toxicokinetics.....	36
3.3.2 Cu toxicodynamics and the effects of salinity fluctuation.....	39
3.3.3 Cu concentrations of dead clams during the toxicity tests.....	41
3.4 Conclusion.....	43
Chapter 4 Effects of DOC on the bioaccumulation and toxicity of Cu in an estuarine clam.....	44
4.1 Introduction	44
4.2 Material and methods	44
4.2.1 Preparation of the seawater.....	44

4.2.2 Cu uptake and elimination under low DOC concentrations	45
4.2.3 Cu uptake and elimination under different DOC levels.....	46
4.2.4 Toxicity tests under different DOC levels.....	47
4.2.5 Statistical analysis.....	47
4.3 Results and discussion.....	48
4.3.1 Effects of low DOC on Cu toxicokinetics	48
4.3.2 Effects of DOC on Cu toxicokinetics	50
4.3.3 Effects of DOC on Cu toxodynamics	52
4.4 Summary	56
Chapter 5 Summary and perspectives.....	57
5.1 Summary	57
5.1.1 Effects of salinity on bioaccumulation and toxicity of Cu	57
5.1.2 Effects of salinity fluctuation on bioaccumulation and toxicity of Cu	57
5.1.3 Effects of DOC on bioaccumulation and toxicity.....	58
5.2 Innovations	58
5.3 Perspectives.....	58
References.....	60
Appendix.....	67
Publication	72
Acknowledgement	73

摘要

河口水化学条件复杂多变,其中盐度和溶解性有机质是影响重金属毒性的关键因素。盐度和溶解性有机质不仅会影响重金属的生物有效性和生物累积,还会影响生物的生理,改变生物对重金属的内在敏感度。本论文选用光滑河蓝蛤为作为模式生物,以毒代动力学-毒效动力学模型为框架,结合稳定同位素示踪实验和毒性测试,研究河口水化学条对铜(Cu)生物累积和毒性的影响,获得研究结果如下:

(1) 盐度对光滑河蓝蛤 Cu 生物累积和毒性的影响: 当 Cu 浓度较低时(6-9 $\mu\text{g/L}$), 在 5-30 盐度范围内, Cu 的吸收速率常数 $[\text{L}/(\text{g}\cdot\text{h})]$ 随盐度上升而显著降低, 且可用经验方程“吸收速率常数 $=1/(1.35+0.116\cdot\text{盐度})$ ”定量描述。当 Cu 的浓度较高时(300-500 $\mu\text{g/L}$), 盐度对 Cu 生物累积的抑制作用不显著, Cu 的毒性随盐度的升高而增大。在盐度 5、15 和 30 条件下, Cu 的半致死浓度分别为 269 $\mu\text{g/L}$ 、224 $\mu\text{g/L}$ 和 192 $\mu\text{g/L}$ 。Cu 毒性的增大可以解释为致死速率随着盐度的升高而增大, 即从 0.44 $\text{mg}/(\mu\text{g}\cdot\text{h})$ 上升至 2.08 $\text{mg}/(\mu\text{g}\cdot\text{h})$, 其可能的生理学机制是偏离生物的最适宜盐度造成渗透压胁迫。

(2) 波动盐度对 Cu 生物累积和毒性的影响: 光滑河蓝蛤暴露于低浓度(7-10 $\mu\text{g/L}$) 的 Cu 72 h; 当盐度恒定为 5、15 和 25 时, Cu 的吸收速率常数分别为 0.877 $\text{L}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 、0.554 $\text{L}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 0.410 $\text{L}/(\text{g}\cdot\text{h})$; 当盐度以 12 h 为周期在 5-25 范围内连续波动时, Cu 的生物累积曲线可根据恒定盐度条件下测定的吸收速率常数进行预测, 预测值与实测值吻合度较高, 1:1 回归线的 r^2 为 0.915。光滑河蓝蛤暴露于高浓度(422-500 $\mu\text{g/L}$) 的 Cu 72 h; 当盐度在 5-25 范围内周期波动时, 蛤的生存率亦可由 3 个恒定盐度条件下所获取的毒代动力学-毒效动力学模型参数预测, 预测值与测量值的 1:1 回归线的 r^2 达 0.969。

(3) 溶解性有机质(DOC)对 Cu 生物累积和毒性的影响: DOC 的浓度较低($< 2.50 \text{ mg/L}$) 时, DOC 主要通过络合作用改变 Cu 的形态分布, 降低 Cu 的吸收速率常数, 从而减小 Cu 的累积; 且在低 Cu 浓度条件下, DOC 对 Cu 吸收的抑制作用更显著。当 DOC 浓度较高($> 2.50 \text{ mg/L}$) 时, Cu 的生物累积反而更

大，其原因是 DOC 在盐分作用下发生絮凝，絮凝物吸附溶液中的 Cu，进而被蛤误食进入消化道中。通过絮凝 DOC 摄入的 Cu 并未完全被蛤吸收，因而并未导致更高的毒性。

综上，本论文运用毒代动力学-毒效动力学模型定量研究了盐度和溶解性有机质对光滑河蓝蛤 Cu 累积和毒性的影响。该模型可为预测河口水体 Cu 的生态风险以及制定相应的水质基准提供框架，并可推广至不同的金属和生物物种，为科学管理河口生态系统提供工具。

关键词：铜；盐度；溶解性有机质；毒代动力学-毒效动力学模型；生物配体模型

Abstract

Water chemistry of estuarine ecosystems is complex and dynamic. Among the many factors that affecting the toxicity of metals, salinity and dissolved organic matter (DOM) are the two key factors. Salinity and DOM not only affect the bioavailability and bioaccumulation of metals, but also affect the physiology and intrinsic sensitivity of aquatic organisms. In the study, we investigated the effects of estuarine water chemistry on the bioaccumulation and toxicity of copper (Cu) in a model organism *Potamocorbula laevis* under the framework of the toxicokinetic-toxicodynamic model using the stable isotope tracer technique and toxicity tests. Below are the major results of this study:

(1) The effects of salinity on the bioaccumulation and toxicity of Cu in the clam *P. laevis*: At low Cu concentrations (i.e., 6-9 $\mu\text{g/L}$), Cu uptake rate constant [k_u , L/(g·h)] decreases significantly with salinity (5-30) and can be quantitatively described with the empirical equation: $k_u = 1/(1.35+0.116 \cdot \text{Salinity})$. At high Cu concentrations (i.e., 300-500 $\mu\text{g/L}$), the inhibitive effects of salinity against the bioaccumulation of Cu are not significant; Cu toxicity increases with the elevation of salinity. The median lethal concentrations are 269 $\mu\text{g/L}$, 224 $\mu\text{g/L}$, and 192 $\mu\text{g/L}$ at salinity 5, 15, and 30, respectively. The increases of Cu toxicity can be explained by the increased killing rate of Cu from 0.44 mg/($\mu\text{g} \cdot \text{h}$) to 2.08 mg/($\mu\text{g} \cdot \text{h}$). The probable underlying physiological mechanism is the deviation from the optimal salinity of the clam.

(2) The effects of salinity fluctuation on the bioaccumulation and toxicity of Cu in the clam *P. laevis*. At low Cu concentrations (6-9 $\mu\text{g/L}$), the uptake rate constant (k_u) were 0.877、0.554 and 0.410 $\mu\text{g/L}$ at fixed salinity 5, 15 and 30, respectively. The 1:1 regression line between measured and modeled data, $r^2=0.915$; At high Cu concentrations (422-500 $\mu\text{g/L}$), the 1:1 regression line between measured and modeled data, $r^2=0.969$. TK-TD model provides good prediction in this study.

(3) The effects of DOC on the bioaccumulation and toxicity of Cu in the clam *P.*

laevis. At low DOC concentrations (< 2.50 mg/L), DOC lowered the uptake rate constant (k_u) of Cu by reducing the concentration of bioavailable Cu species. These effects of DOC were more obvious at low Cu concentrations. At high DOC concentrations (> 2.50 mg/L), effects of DOC on Cu bioaccumulation was unexpected. DOC increased the bioaccumulation of Cu. We speculated that it was due to the flocculation of DOC, which acted as a carrier of Cu and was ingested by the filter-feeding clams. The increased Cu bioaccumulation was not translated into higher toxic effects, presumably due to the lower toxicity of intestinal Cu, which can be egested rapidly. Overall, DOC showed protective effects against the toxicity of Cu.

In conclusion, this study use toxicokinetic-toxicodynamic model to predict and quality the effects of salinity and DOM on the bioaccumulation and toxicity of copper (Cu) in a model organism *Potamocorbula laevis*. This model could be used to different metals or different biological species, providing a framework for organizing future studies in this area, and facilitate the better management of metal risks in estuarine systems.

Key words: Copper; Salinity; Dissolved Organic Carbon; Toxicokinetic-Toxicodynamic Model; Biotic Ligand Model

第一章 绪论

铜 (Cu) 是河口及近海环境中最为常见的重金属污染物^[1-3], 具有很高的毒性^[4]。水化学决定了 Cu 的形态分布, 从而对 Cu 的生物有效性起决定性作用。如果水化学条件不明, 仅测定 Cu 的总浓度无法准确预测其生物效应。在制定河口水体 Cu 的水质基准时, 定量考虑水化学的影响可以提高基准的科学性, 使之宽严适度, 有利于将有限的环境保护资源效用最大化。

河口处在淡水到咸水的过渡区域, 水化学条件复杂多变, 其中盐度和溶解性有机质 (Dissolved Organic Matter, DOM) 是影响 Cu 生物有效性的主要因素。与此同时, 河口水体受到人类活动的强烈影响, 重金属污染通常较其它水体更为严重。目前, 已有很多关于河口水化学影响 Cu 毒性的研究^[5-7], 但很难从中总结出河口水化学影响 Cu 毒性的一般规律, 以至研究成果很难被吸收到环境风险管理中去。在进行生态风险评价和建立水环境质量基准时, 定性地知道有影响是远远不够的, 还需要定量地预测影响有多大。然而目前尚无模型工具可以全面定量河口水体各水化学参数对 Cu 毒性的影响。

生物配体模型 (Biotic Ligand Model, BLM) 是预测水化学如何影响重金属毒性的有力工具^[8-10]。美国环保署已将该模型用于建立 Cu 的淡水水质基准^[11], 欧盟和加拿大等国的环保部门也将在制定水质基准时采用 BLM^[5]。然而目前的 BLM 只能预测水化学对重金属生物有效性的影响且仅限于水体之中以及水与生物的界面之上, 无法预测水化学对生物生理的影响^[8, 12]。此外, BLM 是一个静态的模型, 只适用于特定时长的暴露实验 (如 48 h 半数致死)^[13-14]。在河口水体中, 盐度不仅通过络合、竞争改变 Cu 的生物有效性, 也强烈地影响着生物的生理 (如渗透压调节), 本身就造成胁迫。DOM 除了强烈地络合 Cu, 还会改变生物的生理学机能。因此, 建立河口系统的 BLM 时, 必须考虑水化学对生物生理的影响, 然而目前的 BLM 无法实现这样的操作。

本研究引入毒代动力学-毒效动力学 (Toxicokinetic-Toxicodynamic, TK-TD) 改进 BLM, 改进的 BLM 不仅适用于河口水体, 还能用于非特定时间、盐度连续变化条件暴露下的毒性实验。选用光滑河蓝蛤 (*Potamocorbula laevis*) 为作为模

型生物，光滑河蓝蛤是一种小型双壳贝类，广泛分布于我国沿海地区，栖息于潮间带及低潮区浅水处是河口水体主要的底栖生物之一。其易于采集，在实验室条件下易于培养，是进行生态毒理学研究良好的模式生物。

1.1 我国河口及近海环境中 Cu 污染概况

1.1.1 我国河口及近海海域中 Cu 的污染状况

随着社会经济的快速发展和城镇化进程的不断加速，工农业及城市废水的排放对河口及近海环境污染的贡献越发显著，重金属污染是其中一个热点问题^[15]。Cu 的用途众多，Cu 污染的来源广泛，除了地表径流、岩石风化、海底火山爆发等自然途径，矿山开采、水产养殖、工农业及城市废水排放、电子垃圾倾倒、废气排放及化石燃料燃烧等人类活动也将大量的 Cu 输入土壤、河流等环境中，再通过各种途径汇入河口及海洋系统^[16-17]。因而，Cu 污染在河口水体中极为常见^[1-3]。Cu 对水生生物的毒性较高^[4]，其毒性通常仅次于 Hg 和 Ag。Cu 能干扰生物 Na⁺ 的运输、酸碱平衡及氮的排泄等，影响生物体内渗透压的调节，从而产生毒性^[7]。

进入河口水体的 Cu 在水、悬浮颗粒、生物体、沉积物以及大气间不断地进行分配和交换，其中水和沉积物是 Cu 的两个重要的储库^[18-19]。下面简要介绍我国主要河口及近海环境中 Cu 的污染状况。

渤海是半封闭型海湾，水域面积小，水力交换条件较差，周边存在大量冶炼、石化工业，是我国近海 Cu 污染最严重的区域之一。Wang^[20]指出锦州湾海域水体中 Cu 浓度范围为 1.71-3.49 μg/L。Zheng^[21]在锦州湾葫芦岛锌冶炼厂周边的表层沉积物中检测到 Cu 的最高浓度为 1072 mg/kg。Xu^[22]等在渤海湾山东区一处河口区水体和沉积物中分别检测到 Cu 浓度 2755 μg/L 和 1462 mg/kg。

长江是我国最大的河流，河口三角区是我国城市分布最密集、经济最为繁荣的区域之一。长江平均水流量为 $9.28 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$ ，沉积物负载通量约 $4.8 \times 10^8 - 5 \times 10^8 \text{ t/a}$ ，超过 90% 的悬浮沉积物最终沉积于中国东海内陆架和长江河口区域，这一过程使得大量的金属输入河口及近海环境^[23-25]。Fang^[26]指出我国东海表层沉积物受到轻微的 Cu 污染，该区域 Cu 的沉积通量为 $3.10 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。Zhang^[27]的研究表明在

长江口潮间带表层沉积物中存在局域性的 Cu 污染。孟翊^[28]和孙毅^[29]报道指出,长江河口及邻近海域表层沉积物都受到了不同程度的 Cu 污染。柴小平^[30]调查表明,杭州湾海域表层沉积物中 Cu 含量(均值为 20.6 mg/kg)总体呈上升趋势,有潜在生态风险。滕德强^[31]等对长江口及其邻近海域表层沉积物中的重金属进行测定时发现,长江口及其邻近海域表层沉积物中 Cu 浓度范围为 2.00-37.75 mg/kg。

珠江水系是我国第二大河流系统,是我国工业化和城镇化高度发达的地区,珠江口及周边近海区域也是受 Cu 污染的典型区域。根据调查显示^[32-33],珠江口区海水中溶解态 Cu 浓度范围为 0.34-3.26 $\mu\text{g/L}$,沉积物中 Cu 浓度高达 90 mg/kg。据报道,Cu 在珠江口内的均值比口外近海高约 3-5 倍,并且该区域人为输入的 Cu 具有较高的生物可利用性及迁移性^[34-35]。珠三角表层沉积物中 Cu 的含量通常比次表层沉积物中高^[36],这表明其输入量因受人类活动的影响,较过去有所提高。

九龙江是福建省第二大河,九龙江口是我国南方污染最为严重的河口之一。Pan 和 Wang 测定了九龙江口北岸水域溶解态金属的浓度,其中 Cu 的浓度范围为 9.14-74.90 $\mu\text{g/L}$ ^[37],沉积物中 Cu 浓度范围为 45-223 $\mu\text{g/L}$ ^[38]。福建第一大河闽江同样也面临着严重的 Cu 污染问题,其河口区湿地沉积物中 Cu 含量均值为 45.22 mg/kg^[39]。Cu 也是福建浅海沉积物中的主要污染金属^[40]。

潘科等^[41]也在胶州湾、长江口、杭州湾、深圳湾、三亚湾等地发现了在水体和沉积物中存在 Cu 污染的现象。由此可见,我国河口及近海海域 Cu 污染情况非常严峻,污染主要集中在工业和人口密集区域、排污口附近及养殖区域。

1.1.2 我国河口及近海环境中双壳类动物受 Cu 污染概况

双壳类动物属软体动物门瓣鳃纲,是无脊椎动物中种类最为繁多、分布最广泛的动物之一,约有 2 万种。海洋双壳贝类分布广泛,大多栖息于河口及近岸,其成体为固着形生活方式,活动范围小,以滤食为主要摄食方式^[42]。

双壳类动物滤水能力强,加之其分布广泛,不易移动,对重金属有较高的累积能力,常被用作重金属污染的监测生物^[43-47]。双壳类动物对重金属的累积能力除了与自身生物学过程有关,还取决于环境中的重金属的生物可利用性,因而其

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库