

图书在版编目 (CIP) 数据

高原湖泊溶解性有机氮生物地球化学：以洱海为例 /
王圣瑞等著. — 杭州：浙江大学出版社，2019.3
ISBN 978-7-308-18795-4

I . ①高… II . ①王… III . ①洱海—有机氮—生物地
球化学—研究 IV . ①P942.743.78②P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 287927 号

高原湖泊溶解性有机氮生物地球化学：以洱海为例

王圣瑞 张 莉 李 大 倪兆奎 著

丛书统筹 国家自然科学基金委员会科学传播中心

策划编辑 徐有智 许佳颖

责任编辑 伍秀芳

责任校对 张凌静

封面设计 程 晨

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址：<http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 浙江海虹彩色印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 21.25

字 数 316 千

版 印 次 2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-18795-4

定 价 158.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式 (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

“中国基础研究前沿” 编辑委员会

主 编 杨 卫

副主编 高 文 高瑞平

委 员

韩 宇	王长锐	郑永和
郑仲文	冯 锋	周延泽
高体均	朱蔚彤	孟庆国
陈拥军	杜生明	王岐东
黎 明	秦玉文	高自友
董尔丹	韩智勇	杨新泉
任胜利		

总 序

合抱之木生于毫末，九层之台起于垒土。基础研究是实现创新驱动发展的根本途径，其发展水平是衡量一个国家科学技术总体水平和综合国力的重要标志。步入新世纪以来，我国基础研究整体实力持续增强。在投入产出方面，全社会基础研究投入从 2001 年的 52.2 亿元增长到 2016 年的 822.9 亿元，增长了 14.8 倍，年均增幅 20.2%；同期，SCI 收录的中国科技论文从不足 4 万篇增加到 32.4 万篇，论文发表数量全球排名从第六位跃升至第二位。在产出质量方面，我国在 2016 年有 9 个学科的论文被引用次数跻身世界前两位，其中材料科学领域论文被引用次数排在世界首位；近两年，处于世界前 1% 的高被引国际论文数量和进入本学科前 1‰ 的国际热点论文数量双双位居世界排名第三位，其中国际热点论文占全球总量的 25.1%。在人才培养方面，2016 年我国共 175 人（内地 136 人）入选汤森路透集团全球“高被引科学家”名单，入选人数位列全球第四，成为亚洲国家中入选人数最多的国家。

与此同时，也必须清醒认识到，我国基础研究还面临着诸多挑战。一是基础研究投入与发达国家相比还有较大差距——在我国的科学研究与试验发展 (R&D) 经费中，用于基础研究的仅占 5% 左右，与发达国家 15%~20% 的投入占比相去甚远。二是源头创新动力不足，具有世界影响

力的重大原创成果较少——大多数的科研项目都属于跟踪式、模仿式的研究，缺少真正开创性、引领性的研究工作。三是学科发展不均衡，部分学科同国际水平差距明显——我国各学科领域加权的影响力指数(FWCI值)在2016年刚达到0.94，仍低于1.0的世界平均值。

中国对基础研究高度重视，在“十三五”规划中，确立了科技全面创新中的引领地位，提出了加强基础研究的战略部署。习近平总书记在2016年全国科技创新大会上提出建设世界科技强国的宏伟蓝图，并在2017年10月18日中国共产党第十九次全国代表大会上强调“要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破”。国家自然科学基金委员会作为我国支持基础研究的主渠道之一，经过30多年的探索，逐步建立了包括研究、人才、工具、融合四个系列的资助格局，着力推进基础前沿研究，促进科研人才成长，加强创新研究团队建设，加深区域合作交流，推动学科交叉融合。2016年，中国发表的科学论文近七成受到国家自然科学基金资助，全球发表的科学论文中每9篇就有1篇得到国家自然科学基金资助。进入新时代，面向建设世界科技强国的战略目标，国家自然科学基金委员会将着力加强前瞻部署，提升资助效率，力争到2050年，循序实现与主要创新型国家总量并行、贡献并行以至源头并行的战略目标。

“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两套丛书正是在这样的背景下应运而生的。这两套丛书以“科学、基础、前沿”为定位，以“共享基础研究创新成果，传播科学基金资助绩效，引领关键领域前沿突破”为宗旨，紧密围绕我国基础研究动态，把握科技前沿脉搏，以科学基金各类资助项目的研究成果为基础，选取优秀创新成果汇总整理后出版。其中“中国基础研究前沿”丛书主要展示基金资助项目产生的重要原创成果，体现科学前沿突破和前瞻引领；“中国基础研究报告”丛书主要展示重大资助项目结题报告的核心内容，体现对科学基金优先资助领域资助成果的

系统梳理和战略展望。通过该系列丛书的出版，我们不仅期望能全面系统地展示基金资助项目的立项背景、科学意义、学科布局、前沿突破以及对后续研究工作的战略展望，更期望能够提炼创新思路，促进学科融合，引领相关学科研究领域的持续发展，推动原创发现。

积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉。希望“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两套丛书能够成为我国基础研究的“史书”记载，为今后的研究者提供丰富的科研素材和创新源泉，对推动我国基础研究发展和世界科技强国建设起到积极的促进作用。



第七届国家自然科学基金委员会党组书记、主任

中国科学院院士

2017年12月于北京

前 言

溶解性有机氮 (dissolved organic nitrogen, DON) 是湖泊有机氮和溶解性有机质的活跃组分, 其含量、结构组分、生物有效性及生态环境效应, 特别是在湖泊氮循环过程中的作用及对水污染和富营养化的影响, 逐步受到关注和重视, 并已成为研究热点。湖泊环境复杂, 各介质 DON 来源、化学组成、结构及影响因素等各异。目前国际上针对湖泊 DON 的研究重点涉及研究方法、过程机制与环境效应等方面, 但相关工作并不系统, 尚未建立 DON 特征及变化与环境效应之间的关联关系。

就湖泊 DON 的研究方法而言, 主要集中在含量测定、结构和生物有效性表征等方面。DON 结构组分因来源和化学特征等不同而差异显著, 来源和化学特征也可在一定程度上表征 DON 生物有效性, 进而分析和判定其对水环境的影响。DON 结构组分的表征方法, 包括气相色谱分析法、高效液相色谱法、凝胶电泳法、质谱分析法、三维荧光光谱法、红外光谱法、紫外—可见光谱法、核磁共振波谱法、X 射线光谱法和酶解法等。其中, 三维荧光光谱技术近年来得到快速发展, 已被广泛应用于区分湖泊 DON 结构、组成和来源等方面的研究。而伴随高分辨率质谱等先进分析技术的发展及应用, DON 组分及结构研究进入了分子水平。

针对湖泊 DON 过程机制与环境效应等方面, 围绕上覆水、沉积物、悬浮颗粒物等不同介质和水—陆、水—气、沉积物—水等不同界面系统, 以 DON 迁移转化、降解、释放、分配、生物有效性、水环境影响及与流

域间的响应关系等为重点,开展了大量研究,深入认识了 DON 环境行为。湖泊 DON 结构组分等特征导致其具有高水溶性和高生物活性等环境特性,显著影响环境氮磷、重金属、有机污染物等的迁移、转化、降解等化学生物学行为。

洱海是云南省第二大高原淡水湖泊,属澜沧江—湄公河水系,是苍山洱海国家级自然保护区和风景名胜区的核心区,也是大理市主要饮用水源地,是大理人民赖以生存和发展的“母亲湖”。根据最新测量数据,洱海流域面积 2565 平方公里,湖面面积 252 平方公里,蓄水量 29.59 亿立方米,平均水深 10.8 米。该流域农业发达,坝区经济特征明显,具有典型高原湖泊特征。流域丰沛的降雨及特殊的地形等因素导致入湖河流汇集速度较快,湖泊营养盐累积特征明显;充足的光照和适宜的温度等气候条件,使湖泊营养盐周转效率较高;不同介质及来源 DON 含量变化较大,占总氮比例不容忽视,其在湖泊氮循环、氮供给及富营养化过程中可能发挥着较为独特的作用。

基于此,本书针对高原湖泊 DON 结构组分表征及环境影响问题,围绕湖泊 DON 生物地球化学研究主线,以洱海为重点,分别针对上覆水、表层和柱状沉积物及湿沉降等介质与不同输入来源,从结构组分表征、指示意义、过程机制及与流域响应关系等方面,系统梳理了湖泊 DON 研究概况与研究方法及进展,并应用多手段联合表征和高分辨率质谱技术等深入解析了洱海 DON 结构组分及分子特征,研究了高原湖泊上覆水和沉积物 DON 结构组分特征及指示意义,探究了沉积物 DON 结构组分差异、生物有效性及演变问题,深入剖析了高原湖泊 DON 生物地球化学过程。本研究推动了湖泊 DON 研究从结构组分表征延伸至环境行为与影响因素等方面,并试图从 DON 生物地球化学视角进一步揭示高原湖泊富营养化机制。

具体来讲,本书共分为 9 章,总体设计了三方面的内容。其中,第一方面介绍湖泊 DON 研究概况及进展,包括第 1 章湖泊 DON 研究概述和第 2 章湖泊 DON 研究方法;第二方面以洱海为重点,介绍高原湖泊 DON 结构组分特征及指示意义,包括第 3 章高原湖泊 DON 结构组分表征及分子

特征，第 4 章高原湖泊上覆水 DON 结构组分特征及指示意义，第 5 章高原湖泊沉积物 DON 结构组分特征及指示意义；第三方面以洱海为重点，介绍高原湖泊溶解性有机氮过程机制及环境效应，包括第 6 章高原湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分差异及生物有效性，第 7 章高原湖泊溶解性有机氮界面过程及机制，第 8 章高原湖泊柱状沉积物溶解性有机氮演变及对流域响应。最后第 9 章是对高原湖泊溶解性有机氮的研究展望。

王圣瑞负责本书的总体设计，组织编写了第 1 章、第 4 章、第 6 章和第 8 章，并梳理和加工了相关章节，完成了最后的统稿与校对等工作。张莉负责编写了第 2 章和第 3 章，参与编写了其他章节；李大负责编写了第 5 章；倪兆奎负责编写了第 7 章；张莉、倪兆奎等也参与了本书的最后统稿。本书的出版得到了北京师范大学、中国环境科学研究院等单位的支持和帮助。团队研究生承担了部分试验研究和数据资料整理等工作。

本书是国家自然科学基金项目“高原湖泊有机氮磷界面过程与藻类水华发生风险研究”(NSFC- 云南联合基金, No.U1202235) 等项目课题的成果总结，其他成果还在进一步整理。项目研究期间和本书成稿过程中得到了很多专家学者的指导和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，本书难免存在不足，恳请批评指正。

目 录

第1章 湖泊溶解性有机氮研究概述	1
1.1 湖泊溶解性有机氮生物地球化学研究	2
1.1.1 湖泊溶解性有机氮特征及研究意义	2
1.1.2 湖泊溶解性有机氮研究内容及关注重点	5
1.2 湖泊溶解性有机氮研究方法及进展	8
1.2.1 湖泊溶解性有机氮分组方法及进展	8
1.2.2 湖泊溶解性有机氮表征方法及进展	9
1.2.3 湖泊溶解性有机氮生物有效性研究方法及进展	11
1.2.4 湖泊溶解性有机氮研究方法难点	12
1.3 湖泊溶解性有机氮过程机制研究及进展	14
1.3.1 湖泊溶解性有机氮循环研究及进展	15
1.3.2 湖泊溶解性有机氮生物有效性研究及进展	17
1.3.3 湖泊溶解性有机氮过程机制研究难点	18
1.4 湖泊溶解性有机氮环境效应研究及进展	18
1.4.1 环境因素对湖泊溶解性有机氮影响研究及进展	19
1.4.2 湖泊溶解性有机氮对水污染贡献研究及进展	20
1.4.3 湖泊溶解性有机氮环境效应研究难点	21
1.5 本章小结	22

第2章 湖泊溶解性有机氮研究方法	25
2.1 湖泊溶解性有机氮分离与富集方法	25
2.1.1 树脂分离方法	26
2.1.2 基于分子量的组分分离方法	28
2.1.3 离子交换层析组分分离方法	32
2.1.4 仪器分组分离方法	34
2.2 湖泊溶解性有机氮结构组分表征方法	37
2.2.1 紫外吸收光谱表征方法	37
2.2.2 三维荧光光谱表征方法	38
2.2.3 高分辨率质谱表征方法	39
2.2.4 气相色谱—质谱表征方法	45
2.2.5 傅里叶红外光谱表征方法	53
2.3 湖泊溶解性有机氮测定及生物有效性表征方法	57
2.3.1 湖泊溶解性有机氮测定方法	58
2.3.2 湖泊溶解性有机氮生物有效性表征方法	59
2.4 本章小结	61
第3章 高原湖泊溶解性有机氮结构组分表征及分子特征	65
3.1 多手段表征高原湖泊湿沉降溶解性有机氮结构组分特征	66
3.1.1 洱海流域湿沉降溶解性有机氮含量特征	66

3.1.2	多手段表征洱海流域湿沉降溶解性有机氮结构组分特征	67
3.2	多手段表征高原湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分特征	71
3.2.1	洱海沉积物溶解性有机氮含量分布及结构组分表征	72
3.2.2	多手段表征洱海沉积物溶解性有机氮结构组分特征	78
3.3	高分辨率质谱解析高原湖泊溶解性有机氮分子组成特征	84
3.3.1	洱海流域湿沉降溶解性有机氮分子特征及环境意义	84
3.3.2	洱海沉积物溶解性有机氮分子特性及环境意义	87
3.4	本章小结	96
 第4章 高原湖泊上覆水溶解性有机氮结构组分特征及指示意义		99
4.1	高原湖泊洱海上覆水溶解性有机氮特征及指示意义	99
4.1.1	洱海上覆水溶解性有机氮含量及分布特征	100
4.1.2	洱海上覆水溶解性有机氮结构特征	103
4.1.3	洱海上覆水溶解性有机氮结构特征与湖泊水质关系	109
4.2	高原湖泊洱海不同来源溶解性有机氮特征及指示意义	110
4.2.1	洱海不同来源溶解性有机氮含量及分布特征	111
4.2.2	洱海不同来源溶解性有机氮光谱特征	113
4.2.3	洱海不同来源溶解性有机氮组分结构特征与湖泊水质间关系	119
4.3	高原湖泊上覆水溶解性有机氮特征及指示意义	121

4.3.1	高原湖泊上覆水溶解性有机氮组分特性	122
4.3.2	高原湖泊上覆水溶解性有机氮来源特征	126
4.3.3	高原湖泊上覆水溶解性有机氮组分的指示意义	128
4.4	本章小结	131

第5章 高原湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分特征 及指示意义 133

5.1	高原湖泊洱海沉积物溶解性有机氮时空分布特征 及水质影响	134
5.1.1	洱海表层沉积物溶解性有机氮含量特征	134
5.1.2	洱海表层沉积物溶解性有机氮季节变化特征	136
5.1.3	洱海沉积物溶解性有机氮垂向变化特征	137
5.1.4	洱海沉积物溶解性有机氮影响因素	139
5.1.5	沉积物溶解性有机氮对洱海水质影响	141
5.2	高原湖泊洱海沉积物不同分子量溶解性有机氮特征及 与水质关系	143
5.2.1	洱海沉积物不同分子量溶解性有机氮空间分布 及影响因素	144
5.2.2	洱海沉积物不同分子量溶解性有机氮含量 与水质关系	149
5.3	高原湖泊沉积物溶解性有机氮组分特征及指示意义	150
5.3.1	高原湖泊溶解性有机氮含量特征	151
5.3.2	高原湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分特征	153

5.3.3	沉积物溶解性有机氮组分与高原湖泊营养水平间关系	161
5.4	不同营养水平湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分特征 及指示意义	162
5.4.1	不同营养水平湖泊沉积物溶解性有机氮 紫外—可见光谱特征	163
5.4.2	不同营养水平湖泊沉积物溶解性有机氮三维荧光 光谱特征	163
5.4.3	不同营养水平湖泊沉积物低分子量挥发性/半 挥发性溶解性有机氮	168
5.4.4	沉积物溶解性有机氮结构组分的指示意义	169
5.4	本章小结	173
第6章 高原湖泊沉积物溶解性有机氮结构组分差异 及生物有效性		177
6.1	高原湖泊沉积物溶解性有机氮含量及结构组分差异	178
6.1.1	高原湖泊表层沉积物溶解性有机氮含量差异	178
6.1.2	高原湖泊表层沉积物溶解性有机氮结构组分差异	179
6.1.3	高原湖泊柱状沉积物溶解性有机氮结构组分差异	181
6.2	高原湖泊洱海沉积物溶解性有机氮生物有效性及环境意义	186
6.2.1	菌藻培养洱海沉积物溶解性有机氮生物有效性	187
6.2.2	菌藻培养对洱海沉积物溶解性有机氮结构影响	189
6.2.3	菌藻对比培养洱海沉积物溶解性有机氮生物有效性 及环境意义	192

6.3 本章小结	194
第7章 高原湖泊溶解性有机氮界面过程及机制	197
7.1 洱海悬浮颗粒物分布特征及对溶解性有机氮影响	197
7.1.1 洱海悬浮颗粒物浓度分布特征	198
7.1.2 洱海悬浮颗粒物浓度时空变化原因分析	203
7.1.3 洱海悬浮颗粒物—水界面过程对溶解性有机氮影响	209
7.1.4 洱海悬浮颗粒物对溶解性有机氮界面过程影响机制	217
7.2 洱海沉积物间隙水溶解性有机氮结构组分特征	219
7.2.1 洱海沉积物间隙水溶解性有机氮含量及变化特征	219
7.2.2 洱海沉积物间隙水溶解性有机氮结构组分特征	222
7.2.3 洱海沉积物间隙水溶解性有机氮对湖泊营养水平指示意义	226
7.3 沉积物—水界面溶解性有机氮释放及对洱海水质影响	227
7.3.1 洱海沉积物溶解性有机氮释放动力学特征	228
7.3.2 洱海沉积物不同组分溶解性有机氮释放特征	230
7.3.3 洱海沉积物溶解性有机氮释放的环境意义	237
7.4 洱海悬浮颗粒物—水界面硝化—反硝化作用及对溶解性有机氮影响	239
7.4.1 洱海悬浮颗粒物—水界面硝化—反硝化作用	239
7.4.2 洱海悬浮颗粒物—水界面溶解性有机氮迁移转化	246
7.5 环境因子对洱海界面溶解性有机氮影响	250
7.5.1 光照对洱海上覆水溶解性有机氮影响	251

7.5.2	pH和DO对洱海沉积物溶解性有机氮释放影响	261
7.6	本章小结	263
第8章	高原湖泊柱状沉积物溶解性有机氮演变及 对流域响应	267
8.1	洱海柱状沉积物溶解性有机氮结构组分特征	267
8.1.1	洱海柱状沉积物溶解性有机氮全丰度分布 及分子量特征	268
8.1.2	洱海柱状沉积物溶解性有机氮($I > 4\%$)结构组成 及演变	275
8.1.3	洱海柱状沉积物溶解性有机氮组分演变的环境 指示意义	283
8.2	洱海柱状沉积物溶解性有机氮结构组分对流域响应	284
8.2.1	洱海柱状沉积物氮累积及演变特征	285
8.2.2	洱海柱状沉积物溶解性有机氮对湖泊演变的响应	286
8.3	本章小结	288
第9章	研究展望	291
	参考文献	295
	索 引	315