

内陆水体退化生态系统的恢复

任 海, 张倩媚, 彭少麟

(中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650)

摘 要: 内陆水体生态系统在维持全球物质循环和水分循环中具有重要作用。它的恢复是指重建干扰前的物理条件, 调整水和土壤中的化学条件, 再植水体中的植物、动物和微生物群落。相对静止的湖泊和水库的退化主要由点源污染和非点源污染引起, 需要人类干预才能恢复。治理水体和开展内陆水体生态系统的恢复活动有由下而上和由上而下两种方法, 最重要的是减少营养输入, 控制富营养化问题。河流退化的因素较多, 恢复时最重要的是水质的恢复。内陆水体生态系统的恢复过程项目评估受人类价值和生态系统表现影响, 进行内陆水体生态系统恢复项目评估的标准包括内陆水体生态系统结构、功能和整体特征的评估。

关键词: 生态恢复; 内陆水体生态系统; 生态评估

中图分类号: Q146; P931

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 5221 (2003) 01 - 0022 - 04

内陆水体生态系统在人类生活环境中具有重要的作用。一方面, 维持全球物质循环和水分循环; 另一方面, 可净化水源, 抵御洪水, 提供用水、旅游和交通通道, 提供野生生物栖息地等。虽然全球的水体面积远多于陆地面积, 但其中大部分的是海水, 淡水面积和体积是有限的。本文的内陆水体生态系统主要指湖泊、水库、水塘等相对静止和河流、小溪等流动的淡水生态系统。

随着全球人口的快速增加, 人类的用水量也持续增加, 同时人类对内陆水体生态系统的干扰也日趋严重, 世界范围内的内陆水体生态系统被严重改变或破坏: 许多水体被填埋, 水体中的生物资源被过度开发, 化肥、农药、废油、生活污水和工业三废已严重污染了许多水体并导致水体水质下降^[1, 2]。水体的退化严重制约了人类的用水需求。因此, 内陆水体生态系统的保护、恢复与重建是人类面临的急迫问题。欧洲最早开展了内陆水体生态系统的恢复研究, 美国从 1976 年开始研究^[3, 4], 我国开始时间更晚些。

内陆水体生态系统的恢复, 指重建内陆水体生态系统干扰前的功能及相应的物理、化学和生物特征^[5, 6], 即重建干扰前的物理条件, 调整水和土壤中的化学条件, 再植水体中的植物、动物和微生物群落。

1 湖泊和水库的退化原因及恢复

湖泊和水库的退化是它们在自然演替或发展过程中受自然干扰和人类干扰, 结构 (主要指水生生物群落) 和功能 (主要指水净化能力) 衰退。退化的湖泊、水库一般不能自行净化和恢复, 需要人类干预才能恢复。湖泊和水库的退化主要是由点源污染和非点源污染引起的。在发达国家和部分发展中国家, 已能通过切断排放源来控制点源污染, 但仍不能有效控制由农业等生产活动导致的非点源污染^[7, 8]。具体来说, 湖泊和水库面临的主要胁迫包括: 过多的营养及有机质输入导致富营养化 (例如, 非点源污染导致水体中 N、P 增加, 引起藻类繁殖加快, 进而导致水质下降); 过度养殖 (例如, 草食性鱼类破坏水草群落, 人工养殖时使用大量的饲料导致水体富营养化等); 水体的水文及相关的物理条件的变化 (例如, 筑坝等水利设施导致水体的水文过程中断, 影响了鱼类的洄游); 由于农业、采矿、水源林破坏导致水土流失加剧, 进而引起水体的沉积和淤塞 (损失库容, 水产品产量和质量下降); 外来种的引入引起水体生物群落的退化 (例如, 凤眼莲的大量繁殖使昆明滇池水生生物面临生态灾难, 政府不得不投入大量的经费进行治理)^[9]; 大气及排入水中的酸性物质导致水体酸化, 进而导

收稿日期: 2002 - 06 - 20; 修订日期: 2002 - 10 - 20

基金项目: 中国科学院生物特支费资助项目 (STZ - 01 - 36); 中国科学院生命科学创新小组资助项目 (003031); 广东省自然科学基金资助项目 (021627)

作者简介: 任海 (1970 -), 男, 研究员, 博士。研究方向为恢复生态学和生态系统生态学, 共发表论文 80 多篇。通讯作者: 张倩媚。

致水生生物群落结构简化和有机质分解率下降，抑制水体物质循环；有毒物质污染水体（例如，汞、DDT 等通过生物累积和放大作用影响人类健康）。

治理水体和内陆水体生态系统的恢复活动，可针对上述问题开展。Welch 等提出了由下而上和由上而下的方法^[4]。所谓由下而上是指从食物链的最初层即营养物的输入开始控制，进而实现整个生态系统的恢复；由上而下则是指从水生生物层次开始控制，进而净化整个系统。这种方法适于清除水体中的外来种（例如，广东星湖的苦草大量繁殖后吸收了大量的营养物质，净化了水质，但这种草繁殖过多时只好用收割控制）。

纵观国内外大型水体治理经验可知，在内陆水体生态系统恢复过程中，最重要的是先控制富营养化问题，而控制富营养化的主要方法是减少营养输入。包括分流点源污染，对点源污染过滤，用工程方法移走湖泊中的营养物质，改进农业耕作方式，减少施用化肥和农药量，改进洗衣粉等产品中的含 P 量等^[7]，例如我国昆明滇池治理的第一步就是控制污染源流入^[9]。第二步是清除水体中已有的污染，包括采用沉淀剂净化水体，用活性炭吸附污染物质，用微生物降解水中有机质（含藻类），种植各种水生植物吸附营养物质（最好是重建挺水、浮水和沉水植物群落）^[10]，例如我国的淮河治理就采用重建水生植物群落这种方式^[9]。最近，Carpenter 等根据减少 P 的输入后湖泊的反应，提出富营养化的湖泊可分为 3 类^[3]，第 1 类是可逆转型（减少 P 的输入后湖泊可立即恢复），第 2 类是滞后型（在一定时间内大量减少 P 的输入才可恢复），第 3 类是不可逆转型（仅减少 P 的输入是不可能恢复的）。在此基础上，他们建立了一个模型，该模型有一个状态变量，一个控制变量（相应于 P 的输入和一些管理干涉因素），P 的输入可产生更多的生产力进而产生更大的利润，但在高浓度 P 水平下湖泊生态系统的服务功能下降。模拟结果表明，如果湖泊管理的目标是获取最大经济利润，则 P 的输入应控制在传统的控制水平之下。

2 河流的退化及治理

引起河流退化的因素很多，主要有筑路和建坝、疏浚、水土侵蚀、充填、河岸放牧、农业开发、工业点源污染、伐木、采矿、过渡捕鱼及生活污水排放等^[11-13]。这些因素会导致河流的坡和坝的侵蚀、主渠堵塞、沉积和淤填、洪水频繁、断流、水量下

降、水质下降、水中溶解氧下降、营养物质增加、水生生物减少、水温变幅加大等退化症状。

河流的恢复最重要的是水质的恢复，其方法包括：分离、移走、转移和随时间和空间的稀释^[14]。对退化的河流的治理可采用与湖泊相同的方法，但有 3 点不同：一是因为自然河流有许多通道、水库和浅滩，在恢复时可考虑重建这些附件，并增加河流的蜿蜒度，以增加河流的生境多样性和抗逆性^[14,15]；二是可充分利用河滨或河岸水分和营养充分的特点，先在此区恢复植被，吸引各种动物在此栖息，进而以此为植物源，向周围传播和扩展；三是要从整个生态区或大的景观层次上进行治理^[16]。这是因为人类对自然界的影 响是大尺度的，而且导致水体退化的原因主要不是在水体中形成的，多是在相连的其它生态系统中形成，通过水流等排放引起。事实上，湖泊、小溪、河流、水塘、地下水、湿地、农田、森林、草地、道路、城镇等多种生态系统形成了缀块-廊道-基底镶嵌体，这些生态系统间有能量、物质、物种和信息流动与过滤^[17,18]。虽然开展大尺度工作会面临经费缺乏、土地所有权分散难以协调等问题，但开展水体恢复时必须坚持大尺度（区域，最好是国家级）和长期的目标。只有这样，才能实现整个区域的可持续发展。图 1 显示了人类干扰对内陆水体生态系统影响的 5 类环境因子。

3 内陆水体生态系统的恢复过程

内陆水体生态系统的恢复过程如图 2 所示。当系统不受干扰时，将保持在原有状态附近波动，受到损害性干扰后，一般状态向恶化方向发展。此时，若采取恢复行动，又会产生 3 种不同效果：一是趋于好转，向健康状态发展；二是维持现状；三是趋于恶化，但恶化速度不快。

若不采取恢复行动，状态将持续恶化，并最终向不可逆转的方向发展。值得指出的是，在恢复项目执行期间，其状态会有波动，此时进行评估或预测不准确。在没有经费限制并充分利用现有知识完成的恢复项目一般评价效果最好。现在大部分恢复项目均是在最低可接受的状态以上。

内陆水体恢复的过程是一个复杂的过程，往往需要多种方法结合。例如，华南植物园内的一个水塘在 20 世纪 80 年代前水质较好，后由于水源受污染、厕所排放和枯枝落叶进入水塘腐解等因素导致水体严重富营养化，水体透明度降至 0.4 m，

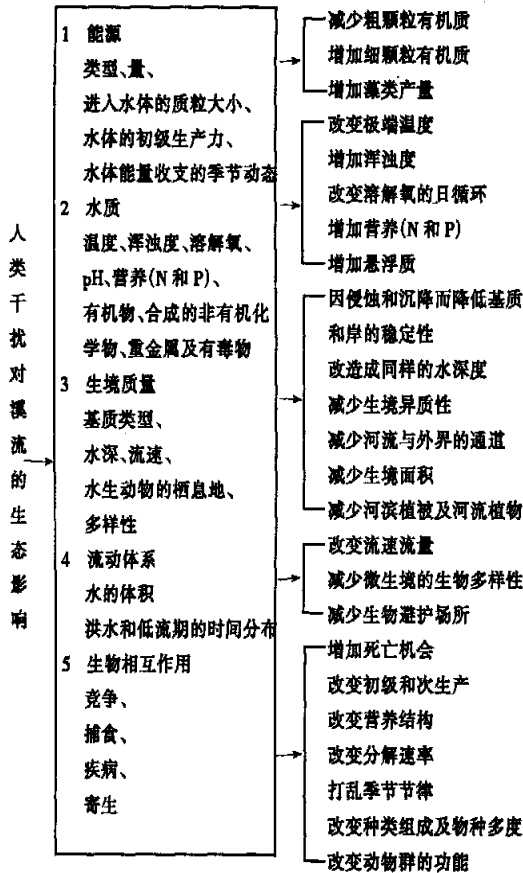


图1 人类干扰对内陆水体生态系统的五类环境因子的影响

Fig.1 Influences of human disturbances on five kinds of environmental factors for terrestrial aquatic ecosystem

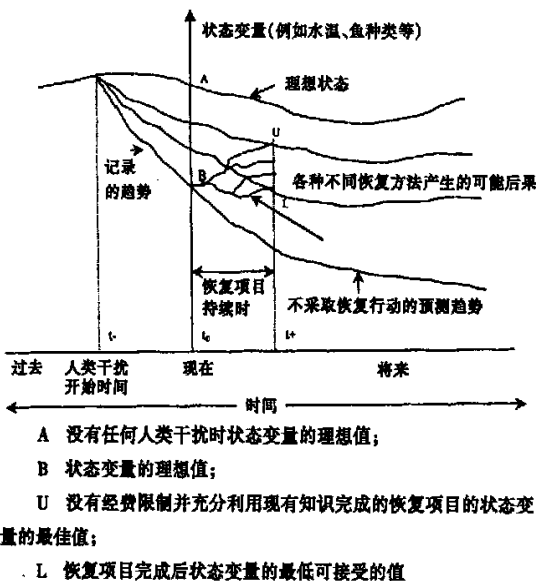


图2 内陆水体生态系统的恢复过程

Fig.2 The restoration process of terrestrial aquatic ecosystem

BOD10.0mg/L, 浮游生物为 2 500 万个/L, 水中高等植物多样性为 0, 完全变为藻型。通过化学生物方法得以治理。治理过程中先以生石灰进行沉淀和灭藻处理, 然后以工业用硫酸调 pH 值至中性, 水变得非常清澈。但该水体缺乏生物活性, 闲置 1 月后又开始生藻。此时又进行了输入活性氧并种植苦草 (*Vallisneria spiralis*) 的工作, 通过沉水植物稳定水体并实现了水体自净功能的可持续性, 最后再种植睡莲等观赏植物, 形成一个小景点^[19]。

4 内陆水体生态系统恢复的评估

在评估生态系统恢复项目时, 人类的价值观会有重要的影响, 人类的价值观一般包括他们期望恢复后在经济利用、景观美学、宗教文化等方面的期待值。如图 3 的项目评估矩阵所示, 项目评估受人类价值和生态系统表现影响: 在矩阵的左下角, 人类的价值和生态系统的表现均不能满足, 因而项目失败 (例如筑坝导致不能灌溉和水质下降); 在矩阵的右上角, 人类的价值和生态系统的表现均能满足, 因而项目成功 (例如, 污水经过处理后排入湖泊, 湖泊又能够净化这些污水); 处于矩阵中间的项目均能在一定程度上接受, 但还有改进的必要。

		人类可接受的阈值			人类希望的阈值		
生态学价值	C	C0	C1	C2	生态学希望值		
	B	B0	B1	B2			
	A	A0	A1	A2			
		0	1	2	人类价值		
分室	生态学价值	人类价值					
A0	不可接受	不可接受					
A1	不可接受	可接受					
A2	不可接受	希望					
B0	可接受	不可接受					
B1	可接受	可接受					
B2	可接受	希望					
C0	希望	不可接受					
C1	希望	可接受					
C2	希望	希望					

图3 项目评估矩阵模式

Fig.3 Matrix model of project assessment

进行内陆水体生态系统恢复项目评估的标准,

包括内陆水体生态系统结构、功能和整体特征的评估^[14,20-22]。

结构特征：水质（包括项目内及相联系的水体的水质，如溶解氧、盐、毒物、污染物、悬浮物、pH、气味、透明度、温度等）；土壤条件（如物理性质、化学性质、侵蚀率、有机碳、稳定性）；地理条件（如地表特征、景观组成）；水文特征（水分循环过程、流速、流量等）；形态和地形特征（位置、地形、生态系统形状、深度等）；生物（如种类、密度、生长量、生产力和群落稳定性等）；承载量、食物网及指示种的营养量等。

功能特征：地表、地下水的贮存、补充及供应；洪水及排淤力；营养物质的沉积、运移及循环；大气湿度（含蒸发等）；溶解氧含量；生物的正常活动；生物生产力、食物网和物种的维持；生态系统获取阳光、风、雨的能力；水的净化能力；侵蚀的控制力；生态系统能量流动情况。

整体标准：恢复力（即生态系统干扰后的可恢复能力）；持续力（即生态系统持续演替中状态或顶极的能力）；与天然群落的近似性（与类似未干扰的生态系统比较）。

虽然对退化水体的恢复研究与实践已有近 60 年的历史，目前也已有了一般性的工作理论与方法，但在实践中要使水体完全恢复是不可能的。这是因为水体生态系统内的组成成分及其相互作用十分复杂，但如果能对其中生物与非生物间的因果关系了解得更清楚，则更易于工作。正如最近一些生态学家建议恢复生态学家应停止探索类似于牛顿定律类的简单定律的行动，相反，我们应该根据恢复目标和恢复对象的复杂性进行更多的研究和实践工作^[23]。

参考文献：

- [1] 谢平, 崔亦波, 陈宜瑜. 中国浅水湖泊退化生态系统 [A]. 陈灵芝, 陈伟烈. 中国退化生态系统研究 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 221 - 233.
- [2] Cooke GD, Welch EB, Peterson SA. Lake and Reservoir Restoration [M]. Butterworth, Stoneham: Mass. 1986. 1 - 10.
- [3] Cairns JJR. The status of the theoretical and applied science of restoration

- ecology [J]. Environ. Prof., 1991, 13 (3): 1 - 9.
- [4] Jordan WR III, Gilpin ME, Aber JD. Restoration Ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press., 1987. 170 - 200.
- [5] Lewis RR III. Wetlands restoration, creation, and enhancement technology [M]. Washington D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 1989. 1 - 17.
- [6] Magnuson JJ HA, Regier HA, Christie WJ. To reinhabit and restore Great Lakes Ecosystems [A]. Christic. The recovery process in Damaged Ecosystems [C]. Ann Arbor, Mich: Ann Arbor Science Publishers, 1980. 27 - 30.
- [7] Campbell PCG, Stokes P. Acidification and toxicity of metals to aquatic biota [J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1985, 42: 2034 - 2049.
- [8] Wilson EO (eds). Biodiversity [M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1988. 1 - 3.
- [9] 蔡晓明. 生态系统生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1 - 284.
- [10] Shapiro J, Wright DI. Lake restoration by biomanipulation [J]. Freshwater Biol, 1984, 14: 371 - 383.
- [11] Hartig JH, Thomas RL. Development of plans to restore degraded areas in the Great Lakes [J]. Environ. Manage, 1988, 12: 327 - 347.
- [12] Karr JR. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale [J]. Special Publication 5. Illinois Natural History Survey, Champaign, 1986, (3): 1 - 28.
- [13] Riley AL. Restoring streams in cities [M]. Washington D. C.: Island Press, 1998. 12 - 15.
- [14] Gore JA. The restoration of rivers and streams [M]. Boston: Butterworth Publishers, 1985. 30 - 35.
- [15] Howes K. Construction of artificial riffles and pools for stream restoration [J]. J. Bio., 1990, 2 (1): 15 - 20.
- [16] Brown JH, Maurer BA. Macroecology: The division of food and space among species on continents [J]. Science, 1989, 243: 1145 - 1150.
- [17] Forman RTT, Godron M. Landscape ecology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986. 1 - 5.
- [18] Turner MG. Landscape heterogeneity and disturbance [M]. New York: Springer - Verlag, 1987. 1 - 6.
- [19] 郭少聪, 任海, 季申芒, 等. 污染对华南植物园水生生态系统的影响 [J]. 生态科学, 2000, 19 (3): 37 - 40.
- [20] Berger JJ. A generic framework for evaluation complex restoration and conservation projects [J]. Environ. Prof., 1991, 13 (3): 254 - 262.
- [21] Dierberg FE, Williams VP. Evaluating the water quality effects of lake management in Florida [J]. Lake Reservoir Manage, 1988, 2: 101 - 111.
- [22] Harkins RD. An objective water quality index [J]. J. Water Pollut. Control. Fed., 1974, 46: 588 - 591.
- [23] Zedler J B. Handbook for restoring tidal wetlands [M]. London: CRC Press, 2001. 1 - 35.

(英文摘要下转第 29 页)

- Precipitation and Foliar Injury [J]. Japan Agriculture Research Quarterly, 1992, 26 (3): 171 - 177.
- [4] Ulrich B, Pankrath J. Effects of Accumulation Air Pollutants in Forest Ecosystem [M]. Dordrecht: Reidel. 1983. 331 - 342.
- [5] 吴甫成, 王晓燕, 邹君, 等. 湖南土壤酸缓冲性能研究 [J]. 农业现代化研究, 2001, 22 (1): 58 - 62.
- [6] 王敬华, 孔晓玲. 施用石灰石粉对红壤酸度的影响 [A]. 王明珠. 红壤生态系统研究 (第一集) [C]. 南昌: 江西科学出版社, 1992. 141 - 145.

A STUDY ON THE ACID BUFFER CHARACTERS OF SUBTROPICAL RED SOILS THROUGH EXPERIMENTS

WANG Xiao-yan^{1,2}, WU Fu-cheng³, TIAN Jun-liang¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Minister of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Changsha Communications University, Changsha 410076, China; 3. Institute of Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410018, China)

Abstract : The buffer capacities and the characters of five types of red soils, which are originated from different materials in the subtropical area of Hunan Province, is compared through experiments. It shows that differences of the buffer capacities (BC) and acid damage capacities (ADC) exist among those soils while the soil buffer processes are similar. The relative order of the BC and ADC of those soils are proposed as follows: slate red soil > limestone red soil > granite red soil > sandstone red soil > quaternary red soil. According to the classified sensitivity degrees, three of those soils belonged to sensitive soils and the other two are extremely sensitive ones. Such study provides scientific proof for controlling the acid soils and for choosing the key harnessing acidic area.

Key words : Buffer character; Buffer capacity; Acid damage capacity; Relative sensitivity; Red soil; Subtropical

(上接第 25 页)

THE RESTORATION OF DEGRADED TERRESTRIAL AQUATIC ECOSYSTEM

REN Hai, ZHANG Qian-mei, PENG Shao-lin

(South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract : The terrestrial aquatic ecosystems play an important role in sustaining global matter and water cycle. The restoration of degraded terrestrial aquatic ecosystem refers to re-establish the physical condition, regulate the chemical condition of water and soil, recover the plant, animal and microbe in the aquatic ecosystem. Lake and reservoir cannot be restored by themselves after they are polluted by spot and non-spot resource pollution. The two main methods of aquatic ecosystem restoration are bottom-to-top and top-to-bottom, both of them involve in decreasing nutrient input and controlling eutrophication. The restoration of degraded river involves in a lot of issues, in which the improvement of water quality is the base. The assessment of restoration project depends on both human value and ecological value. It includes the evaluation of structure, function and integrated characteristics of restoration.

Key words : Restoration; Terrestrial aquatic ecosystem; Ecological assessment