

# PHYTO

Principles and Resources for  
Site Remediation and Landscape Design

## 植物生态修复技术

[美] 凯特·凯能 (Kate Kenne) 尼尔·科克伍德 (Niall Kirkwood) 著

刘晓明 叶森 毛祎月 骆畅 严雯琪 译

中国建筑工业出版社

# 植物生态修复技术

[美] 凯特·凯能 尼尔·科克伍德 著  
刘晓明 叶森 毛祎月 骆畅 严雯琪 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图号：01-2016-8958号

### 图书在版编目（CIP）数据

植物生态修复技术 / (美) 凯特·凯能, (美) 尼克·科克伍德著; 刘晓明等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018.3

ISBN 978-7-112-21552-2

I. ①植… II. ①凯… ②尼… ③刘… III. ①植物-作用-土壤污染-污染防治 IV. ①X53

中国版本图书馆CIP数据核字 (2017) 第288926号

Phyto: Principles and Resources for Site Remediation and Landscape Design / Kate Kennen and Niall Kirkwood, ISBN 9780415814157

Copyright © 2015 Kate Kennen and Niall Kirkwood

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group.

Chinese Translation Copyright © 2019 China Architecture & Building Press

China Architecture & Building Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由英国Taylor & Francis Group出版公司授权中国建筑工业出版社独家出版并在中国销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书贴有Taylor & Francis Group出版公司的防伪标签, 无标签者不得销售。

责任编辑: 杜洁 李杰 董苏华

责任校对: 姜小莲

### 植物生态修复技术

[美] 凯特·凯能 尼尔·科克伍德 著

刘晓明 叶森 毛祎月 骆畅 严雯琪 译

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京锋尚制版有限公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 22 $\frac{3}{4}$  字数: 549千字

2019年1月第一版 2019年1月第一次印刷

定价: 100.00元

ISBN 978-7-112-21552-2

(31199)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 内容简介

本书是一本介绍植物治理污染和植物生态修复技术概念的综合指南，论述了植物在何种情况下可以用来摄取、移除和减少污染物。书中包含了现有的科学研究案例，强调了以植物为基础的清洁技术的优势和缺点，阐释了人工环境中发现的典型污染物群组，列出了可用来减少特殊污染物的植物清单。

这是第一本从设计角度来论述植物生态修复技术优势的书，本书采用了复杂的科学术语，并尝试将有关植物治理方法的研究转化成通俗易懂的参考书。具有典型意义的是，由于植物具有对毒素和有害化学药品产生积极影响的优势，植物生态修复技术已经在治理已污染的土壤中获得实际应用。本书介绍了一个新理念：用具有预防性的植物修复能力来创造投射性的种植设计。在治理特定场地污染的项目实践中采用“植物缓冲区”指日可待。

通过运用表格、照片和细致的绘图，凯能和科克伍德引导读者了解选择植物的过程，其中兼有美学和环境质量的考量，同时展示了移除污染物的益处。

凯特·凯能（Kate Kennen）是一位风景园林师，也是波士顿Offshoots公司的创始人和总经理。Offshoots公司侧重于植物生产技术和植物生态修复技术的咨询。该公司因致力于用植物清理污染场地的项目而多次获奖。凯特在马萨诸塞州的家庭花园里度过了童年，因此熟知美国东南部的植物。她在康奈尔大学读完风景园林学本科，又以优异成绩获得了哈佛风景园林学硕士学位，现执教于该学院。在开办公司以前，她曾在Aspen, Colorado的设计工作室做助理工作。

尼尔·科克伍德（Niall Kirkwood）也是一位风景园林师，哈佛大学设计学院的技术专家和教授，自1992年起一直执教于哈佛大学。他教学、研究和出版的领域包括风景园林设计、人工环境和土地的可持续再利用，包括城市更新、垃圾填埋利用、场地环境技术和国际场地开发。他的著作包括：《生产场地：反思后工业时代景观》（Routledge出版社），

《棕地再生原则：废弃地的清理·设计·再利用》(Island出版社)(除英文版外还译成韩文和中文出版),《风景园林的耐候性和耐久性》(Wiley出版社),《景观细节的艺术》(Wiley出版社)。科克伍德教授是美国风景园林师协会的资深会员,兼任位于北爱尔兰贝尔法斯特的阿尔斯特大学Gerard O'Hare客座教授,位于韩国首尔的高丽大学杰出客座教授、中国清华大学客座教授。

本书可用两个字“全面超越”来描述。本书是迄今为止最全面的植物生态修复技术汇总。通过必要的形式和功能,本书将植物生态修复技术和风景园林设计结合起来,并用于环境治理,从而取得了真正的超越。作为植物生态修复技术的倡导者和培训师,我特别欣赏本书富于说明性的图形、易于理解的描述,它清晰地向技术和施工人员传达了科学、工程、设计和规划的意图。

——David Tsao博士,英国石油公司北美股份有限公司

本书不仅对风景园林师而且对工程师和科学家而言都是极好的资源。由于植物生态修复技术的发展,前沿研究集中在生物化学的工艺流程,而这一领域的“附带利益”的价值并没有被认识到,这主要是因为缺乏知识和资源。本书将社会科学和物理科学交融在一起,讨论了急需解决的问题。本书将基于植物的生态修复技术以奇妙的视觉效果和跨文化的形式呈现出来,这一切都纳入到我们的城市空间,服务于城市公共卫生和我们的生活质量本身。

——Joel G. Burken,密苏里科技大学

本书弥补了植物生态修复技术与实践之间的鸿沟。通过创意设计,作者成功地将一项综合性的课题转译成容易理解的信息。本书还有一个特殊的优点就是预测了针对未来的潜在污染,植物策略将成为风景园林师手中的可预期工具,来防止人类受到土壤、水和空气的污染。

——Jaco Vangronsveld,比利时哈瑟尔特大学环境科学中心

# 致谢

哈佛大学设计学院和艺术与科学学院的John Stilgoe教授最早提议编写本书，作为风景园林、风景园林技术和种植设计这三个领域急需的著作。笔者感谢Stilgoe教授的号召，经历数年此书才得以完成。在这些年间，植物生态修复技术领域自身进一步发展并完善，同时纳入了全新的科学研究和新出现的与生态进程有关的风景区设计理念，以及一些更加开放的、具有时效性的项目。

因此，如果没有来自众多的设计、规划、工程领域及科学界的同事、朋友和专家的建议、知识帮助以及鼓励，这本书是不可能完成的。这是作者与各位植物生态修复技术专家、风景园林师、生态学家、环境工程师和联邦监管人士，以及在读和已毕业的风景区和城市设计研究生多年来积极合作的成果。以下诸位在本书修订过程中发挥了十分重要的作用，我们深表感谢：国际植物生态修复技术协会（International Phytotechnology Society）会长、《植物修复国际期刊》（International Journal of Phytoremediation）主编、康涅狄格州农业试验站的Jason White博士；美国环境保护署 [US Environmental Protection Agency (EPA)] 的Steven Rock；纽约州立大学环境科学与林业学院的Lee Newman博士，他是国际植物生态修复技术协会前任会长和《植物修复国际期刊》联合总编辑；密苏里科技大学，环境研究中心Joel G. Burken博士；英国石油公司北美股份有限公司的David Tsao博士，以及比利时哈瑟尔特大学环境科学中心的Jaco Vangronsveld博士。此外，其他许多科学家和顾问在文本、案例研究、专题研究、审稿和编辑等方面也作出了巨大贡献，这些人的名字和地址已被列入贡献者名单。

特别感谢我们的同事Michael Lindquist和Andrew Hartness，他们不知疲倦地编辑本书的图表；Eammon Coughlin, Jennifer Kaplan, Michael Easler和Jennifer Haskell提供了植物名录的研究，以及Jenny Hill, Renee Stoops和Stevie Falmulari，感谢他们提出的审稿和编辑建议。

笔者也得到了许多本地学界同仁的支持：哈佛大学设计学院的教师们，包括风景

园林系系主任Charles Waldheim, 还有Peter Del Tredici、Gary Hilderbrand、Laura Solano和Alistair McIntosh。还有哈佛大学的健康和全球环境中心的教师Jack Spengler和Eric Chivian也为本书的编写提供了支持。

我们还要感谢哈佛大学设计学院参加GSD9108和6335植物修复研讨会的研究生, 他们于2011年、2012年春季和2013年秋季在哈佛大学设计学院参与了植物生态修复技术的课程, 并进行了案例研究和实习。这本书的某些部分产生于这些课程的课堂讨论和案例研究。参与者包括: Julia Africa, Rebecca Bartlett, Alexis Delvecchio, Kenya Endo, Christina Harris, Nancy Kim, Inju Lee, Amy Linne, Pilsoo Maing, Lauren McClure, Kathryn Michael, Alpa Nawre, Alissa Priebe, Soomin Shin, Patchara Wongboonsin (2011级), Christine Abbott, Naz Beykan, John Duffryn Burns, Amna Chaundhry, Michael Easler, Melissa How, Michael Luegering, Eva Ying, Hatzav Yoffe, Shanji Li (2012级), Kunkook Bae, Edwin Baimpw, Vivian Chong, Karina Contreras, Jennifer Corlett, Omar Davis, Stephanie Hsia, Takuya Iwamura, Jungsoo Kim, Ronald Lim, Leo Miller, Gabriella Rodriguez, Miree Song, Patrick Sunbury, Kyle Trulen (2013级)和Megan Jones (助教, 2013年)。

此外, 我们要感谢在2013年夏季至2014年春季期间对研究和图表工作作出贡献的助手团队。他们是哈佛大学设计学院的教师Zaneta Hong和他的实习生们, 其中包括Shuai Hao, Megan Jones, Geunhwan Jeong, Kara Lam, Ronald Lin, Cali Pfaff, Michele Richmond, Thomas Rogalski, Kyle Trulen和Arta Yazdanseta。

本书的两位笔者都要感谢在本书开发和制作全过程中予以指导与支持的编辑Louise Fox, Landscape of Routledge的副主编/Taylor & Francis, 编辑助理Sade Lee, 制作编辑Ed Gibbons和Routledge出版社的工作人员。

最后, 笔者要感谢我们的家人在本书写作与草稿修订过程中给予的持续不断的支持。尼尔(Niall)要感谢妻子Louise和女儿Chloe各自以自己的方式不断的支持。凯特(Kate)特别要感谢她的丈夫Chris Mian多年来关于植物生态修复技术的耐心聆听, 以及在撰写本书时的无尽帮助。

剑桥, 马萨诸塞州  
2015年春

# 贡献者

## 科学内容、案例研究和评论

Alan Baker, Ph.D.  
The University of Melbourne Australia  
9 Victoria Road  
Felixstowe, SFK IP11 7P, United Kingdom

Michael Blaylock, Ph.D.  
Edenspace Systems Corporation  
210 N 21st Street, Suite B  
Purcellville, VA 20132 USA  
[www.edenspace.com](http://www.edenspace.com)

Sally Brown, Ph.D.  
University of Washington  
School of Environmental and Forest Sciences  
Box 352100  
Seattle, WA 98105, USA

Joel Burken, Ph.D.  
Missouri University of Science and Technology  
1401 N Pine Street  
224 Butler Carlton Hall  
Rolla, MO 65409-0030, USA

Rufus Chaney, Ph.D.  
US Department of Agriculture  
Environmental Management and Byproducts  
Utilization Laboratory  
10300 Baltimore Blvd., Bldg. 007  
Beltsville, MD 20705, USA

Andy Cundy, Ph.D.  
University of Brighton  
School of Environment and Technology  
Lewes Road  
Brighton BN2 4GJ, United Kingdom

Alan Darlington, Ph.D.  
Nedlaw Living Walls  
250 Woolwich St. S Breslau,  
ON NOB 1M0, Canada  
[www.naturaire.com](http://www.naturaire.com)

Mark Dawson, M.S.  
Sand Creek Consultants, Inc.  
151 Mill St.  
Amherst, WI 54406, USA  
[www.sand-creek.com](http://www.sand-creek.com)



Bill Doucette, Ph.D.  
Utah State University  
Utah Water Research Laboratory  
8200 Old Main Hill  
Logan, UT 84322 • 8200, USA

Stephen Ebbs, Ph.D.  
Southern Illinois University  
Department of Plant Biology, Center for Ecology  
420 Life Science II, Mailcode 6509  
1125 Lincoln Drive  
Carbondale, IL 62901, USA

Walter Eifert  
ELM Site Solutions, Inc.  
209 Hunters Woods Lane  
Martinsburg, WV 25404, USA

Stephanie Eisner  
City of Salem, Willow Lake Water Pollution  
Control Facility  
5915 Windsor Is. Rd. N.  
Salem, OR 97303, USA  
[www.cityofsalem.net](http://www.cityofsalem.net)

Stevie Famulari  
North Dakota State University  
Landscape Architecture Department  
620 10th Avenue North  
Fargo, ND 58102, USA

John Freeman, Ph.D.  
Phytoremediation and Phytomining Consultants  
United  
1101 Mariposa St. Gilroy, CA 95020, USA  
[www.phytoconsultants.com](http://www.phytoconsultants.com)

Wolfgang Friesi-Hanl  
AIT Austrian Institute of Technology  
Health & Environment Department  
Environmental Resources & Technologies  
Konrad-Lorenz-Straße 24 3430 Tulln, Austria

Edward G. Gatliff, Ph.D.  
Applied Natural Sciences, Inc.  
7355 Dixon Dr  
Hamilton, Ohio 45011, USA  
[www.treemediation.com](http://www.treemediation.com)

Stanislaw Gawronski, Ph.D.  
Warsaw University of Life Science  
Laboratory of Basic Research in Horticulture  
Faculty of Horticulture, Biotechnology and  
Landscape  
Architecture  
Nowoursynowska 159  
Warsaw 02-787, Poland

Ganga M. Hettiarachchi, Ph.D.  
Kansas State University  
Department of Agronomy  
2107 Throckmorton Plant Sciences Center  
Manhattan, KS 66506, USA

Jenny Hill  
University of Toronto  
35 St George Street, Room 415A  
Toronto, ON M5S 1A4, Canada

Jim Jordahl  
CH2M HILL  
709 SE 9th St.  
Ankeny, IA 50021, USA  
[www.CH2M.com](http://www.CH2M.com)

Mary-Cathrine Leewis, M.S.  
Ph.D. Candidate  
University of Alaska – Fairbanks  
211 Irving I, PO Box 756100  
Fairbanks, AK 99775, USA

Mary Beth Leigh, Ph.D.  
University of Alaska Fairbanks  
Institute of Arctic Biology  
Department of Biology and Wildlife

902 N. Koyukuk Dr.  
Fairbanks, AK 99775, USA

Lou Licht, Ph.D.  
Ecolotree Inc.  
3017 Valley view Ln NE  
North Liberty IA 52317, USA  
[www.ecolotree.com](http://www.ecolotree.com)

Matt Limmer, Ph.D.  
Missouri University of Science and Technology  
1401 N. Pine  
Rolla, MO 65409, USA

Amanda Ludlow  
Roux Associates, Inc.  
209 Shafter Street  
Islandia NY 11749, USA  
[www.rouxinc.com](http://www.rouxinc.com)

Michel Mench, Ph.D.  
INRA (UMR BIOGECO)  
University Bordeaux 1, ave. des Facultes  
Talence 33170, France

Jaconette Mirek, Ph.D.  
Brandenburg University of Technology  
Soil Protection and Recultivation  
Konrad-Wachsmann-Allee 6  
D-03046 Cottbus, Germany

Donald Moses  
US Army Corps of Engineers,  
Omaha District  
1616 Capitol Avenue  
Omaha, NE 68102-4901, USA

Lee Newman, Ph.D.  
State University of New York  
College of Environmental Science and Forestry  
248 Illick Hall, 1 Forestry Drive  
Syracuse NY 13210, USA

Elizabeth Guthrie Nichols, Ph.D.  
North Carolina State University  
College of Natural Resources  
2721 Sullivan Drive  
Raleigh, NC 27695, USA

David J. Nowak, Ph.D.  
USDA Forest Service  
Northern Research Station  
5 Moon Library, SUNY-ESF  
Syracuse, NY 13215, USA

Genna Olson, P.G.  
CARDNO ATC  
2725 East Millbrook Road, Suite 121  
Raleigh, NC 27604, USA  
[www.cardnoatc.com](http://www.cardnoatc.com) – [www.cardno.com](http://www.cardno.com)

Charles M. Reynolds, Ph.D.  
US Army Soil Science–Soil Microbiology  
ERDC–Cold Regions Research and Engineering  
Laboratory  
72 Lyme Road  
Hanover, NH 03755, USA

Steven Rock  
US Environmental Protection Agency (US EPA)  
5995 Center Hill Ave.  
Cincinnati, OH 45224, USA

Christopher J. Rog, P.G. CPG  
Sand Creek Consultants, Inc.  
108 E. Davenport St.  
Rhineland, WI 54501, USA  
[www.sand-creek.com](http://www.sand-creek.com)

Liz Rylott, Ph.D.  
University of York  
CNAP, Department of Biology  
Wentworth Way  
York YO10 5DD, United Kingdom

Jerald L. Schnoor, Ph.D.  
The University of Iowa  
Department of Civil and Environmental  
Engineering  
Iowa City, Iowa 52242, USA

Julian Singer, Ph.D.  
Formerly of University of Georgia  
Savannah River Ecology Laboratory  
Currently with CH2MHill  
540 – 12 Avenue SW  
Calgary, AB T2R 0H4, Canada  
www.CH2M.com

Jason Smesrud, PE  
CH2M HILL  
Water Business Group  
2020 SW 4th Ave., Suite 300  
Portland, OR 97201, USA  
www.CH2M.com

Renee Stoops  
Plant Allies  
1117 NE 155th Ave.  
Portland, OR 97230, USA

David Tsao, Ph.D.  
BP Corporation North America, Inc.  
150 W Warrenville Rd.  
Naperville, IL 60563, USA

Antony Van der Ent, Ph.D.  
Centre for Mined Land Rehabilitation  
Sustainable Minerals Institute  
The University of Queensland  
Brisbane, QLD, 4072, Australia

Jaco Vangronsveld, Ph.D.  
Hasselt University  
Centre for Environmental Sciences

Agoralaan, building D  
Diepenbeek BE-VLI B-3590, Belgium

Timothy Volk  
State University of New York  
College of Environmental Science and Forestry  
346 Illick Hall  
Syracuse, NY 13210, USA

Jason C. White, Ph.D.  
Connecticut Agricultural Experiment Station  
123 Huntington Street  
New Haven, CT 06504, USA

Ronald S. Zalesny Jr., Research Plant Geneticist  
US Forest Service-Phytotechnologies, Genetics  
and Energy Crop Production Unit  
Northern Research Station, 5985 Highway K  
Rhineland, WI 54501, USA

Barbara Zeeb, Ph.D.  
Royal Military College of Canada  
Department of Chemistry & Chemical Engineering  
13 General Crerar, Sawyer Building, Room 5517  
Kingston, ON, Canada K7K 7B4

## 图表

特别感谢以下从业者，他们对本书的图表制作贡献巨大。

Andrew Hartness  
HartnessVision LLC  
Cambridge, MA, USA  
hartnessvision.com

Michael G. Lindquist  
38 Sewall St. Apt. 2  
Somerville, MA 02145, USA

# 序

史蒂夫·洛克 (Steve Rock)

近千年来，人们有意识地通过种植植物来改变他们周边的环境。罗马大道林立着的杨树不仅能够遮阳，还能吸收道路两旁的水分来保持路基的干燥，以此来延长道路的使用寿命。

广泛的植物生态修复技术定义包括地球上一切能实现改善环境的目标的植物。这个领域也从启蒙发展到广泛的应用，从很渺茫的期望发展为成熟的技术，最终这项技术成为环境修复工具箱的一部分，得以普遍接受。

在这一领域被命名之前，人们已经使用植物去推动他们的工作。早在20世纪30年代，植物勘探就已经是预测地下矿物存在的一种方式。特别是在西伯利亚新开发的土地上，淘金者们发现，通过找寻那些只在某些区域生长的植物，可以知道哪里富含某些矿物。值得注意的是，有些植物确实是可靠的矿物探测器，它们的枝和叶所包含的金属量要比那些相同类型但生长在其他地方的植物要多得多。

20世纪70年代，一些研究机构开始对金属和植物之间的关系进行系统的研究和分类，他们发现一些生长在矿物富集的土壤中的植物有着异乎寻常的性能。R. R. Brooks、R. D. Reeves和A. J. M. Baker三位博士与他们的研究团队通过对生长在矿物富集的土壤上和带有不寻常金属含量的植物进行搜寻和编目，发现有些植物的金属含量要比普通植物多，而这些植物最终被命名为富集植物和超富集植物。

在这一时期，社会对普通环境的关注持续加强，这也促使传统农业研究去思考农作物生产中环境污染物的影响，特别是那些潜在的能被吸收的重金属。一种将阴沟中的污泥用作农作物肥料的尝试，使农作物接触到了排放到城市下水道中的工业污染物。人们发现污染物确实移动到一些作物中。美国农业部研究员Rufus Chaney博士认为，种植一些“金属排除器”类的植物或许有助于保证食品安全，我们可以通过种植作物来积累和提取金属，这些作物会被收割用于土壤修复，而并非食品供应。

同样是在20世纪70年代，人们发现了一个植物生态修复的新领域——尝试利用微生物

物去修复环境中的可降解污染物。人们开始研究哪些植物能够加强微生物对杀虫剂和石油产品的降解。很快，研究结果清楚地表明，植物生态系统修复某些污染物的速度更快、程度更高；在一些案例中，植物生态修复技术比单一的微生物系统对污染的治理更彻底。

20世纪80年代人们仍在进行一些基础研究，这吸引了一些大学研究团队、政府机构和私人企业的关注。这一时期国内和国际的环境保护意识得以确立，拟定并通过了一系列环境基本法案，例如净水法案（Clean Water Act）和超级基金支持（CERCLA），引导政府向许多可能的修复项目增加预算。迫于压力，市政当局和企业减少了向空气、水和土壤中排放有毒物质。清洁历史遗存污染物成了一项新的、更大的产业，咨询和承包公司遍地开花，工业和商业公司开始在植物生态修复领域实现了内部分离，政府机构亦有新设或扩大。无怪乎80年代末有些人毫不犹豫地转变他们的想法，将植物生态修复这一新工艺商业化。

在20世纪90年代的出版物和报告中，最早的对植物生态修复技术的定义是，通过植物吸收金属来保护环境。当公司试图去对自己和污染治理的进程作区别和分类时，就产生出了很多术语和定义。“植物- $x \times x$ ”变成了一种不断增长的植物系统名词的创造方式。植物降解、植物提取、植物增强的生态修复等，被用来描述和区分场地的各个方面。另外一些术语，如根际过滤和水力控制也发明出来，并应用到特殊情况中。此时，植物生态修复技术已经成了用植物来达到环境目标的各种行动的保护伞。

20世纪90年代是公司、专利和术语迅速增生的时代。发明专利、技术专利、试验专利都被广泛使用但却并未受到保护。

Edd Gatliff为“树井系统”申请专利时，引出了一个成功的以植物生态修复为基础的专利，即用一个地下井套管和空气管去引导树的根系，使之比在自然状态下渗透得更深。这个系统使树木在地表层下达到一个特定的深度，可以绕过干净的地下水层而接近受污染的地下水。这项新发现结合了一些知名的、新奇的技术和设备，能够对那些达不到深度和位置就不能运行的情况进行矫正。

另一些专利并不具有针对性，而在项目实践中产生了消极影响。相当数量的现场应用和场地试验在这十年的最后阶段失败了，出现这种现象，一部分原因是由于缺少专利法律，一部分则是由于对现实期望过大。

大家都希望植物生态修复技术能够解决普遍存在的低级别土壤重金属污染的问题。涉及的一些重金属，特别是来自溢漏、泄流和大气沉积物的铅，已经存在土壤中达数十年之久。大范围土壤污染区域已经对居民和工人造成了威胁，但几乎没有什么解决工具是经济、无危害而又有效的。金属污染的植物生态修复（植物提取）被寄予了很高的期望，作为一项绿色技术而被纳入了财政预算。

在一些情况下，一部分植物能够自然地富集重金属。这种自然富集通常是少量的、缓慢的，很难脱离本体，并且通常吸收范围狭窄。我们希望一些植物生长得更快，更高，希望使用标准的农业设备和实践能够诱导植物吸收足够的金属来净化土壤。不幸的是，诱导植物提取金属还有一些缺陷，而这些缺陷迄今为止已证明是不可弥补的。这些现实情况包括：广泛应用的化学除污技术造成污染物比自然状态下可溶性高，这时可溶性金属更容易被种植的污染物提取物吸收，而同时也更容易被冲刷到地表水和地下水中，这比将它

们埋在地下风险更大，而从道义上和法律上都无法被人接受。

总有一些高曝光率的示范项目，它们有乐观的新闻报道和引人入胜的配图。植物生态修复技术通过风行的文章进入公众视野，其通常以一片长满向日葵的花田的图片为特征。一些严谨的试验已经确认，植物确实可以吸收大量重金属，若干年后可以清理相当一部分污染，但同时，防止重金属转移的措施会降低这个项目的经济可行性。

早期的“工业助推器”带来了员工和资源的再利用，接下来，承包商和顾问带来了关注点的改变。时至今日，植物提取技术仍是一个受欢迎的学术主题，它研究能够自然吸收、累积足量污染物的植物以成为一个有效的修复工具，或是一种安全的（利用植物）诱导吸收污染物的方法。研究还对这些植物做了一些基因改良尝试。目前，植物提取重金属的效果并没有达到早先的预期，除了持续性的学术和公众关注以外，它并不是生态修复策略的主流。

然而与此同时，植物提取技术背负了很大的压力，历经争议和失败。相比植物提取，其他的植物生态修复技术，如减轻地下水羽流污染、治理石油和溶剂等有机污染物，已经悄然成熟并占据一定地位。运输水分是植物的自然过程，也是植物擅长的。它被有效地应用在垃圾填埋场覆盖层，用于防止降水渗透、控制已被污染的地下水羽流，也用在植物取证中，即用植物跟踪地下污染物。

垃圾填埋场的种植覆盖系统很快就显示出和美国境内很多地方所使用的传统覆盖手段一样的效力。同所有的以植物为基础的系统一样，它的实际效率将会是场所的一项功能。一个全美范围内从1999-2011年的场地研究显示了如何确定一个垃圾填埋场植物覆盖系统的等效性。现在，有数以百计的植物覆盖已付诸实施，还有更多已出现在工程公司的绘图板上而即将变成现实，这些覆盖技术不再被认为是某种实验或创新发明，而变为常规方法的常规运用。

种植树木不仅是为了控制水分，也是为了增强有机体的生物修复能力，普遍存在的轻溶剂污染被纳入很多清洁计划中。尽管大部分金属并不容易转移到植物中，一些其他有机污染物仍然具有足够的可溶性，能够渗透并移动到植物体内，最终被分解，而不需要再进行收割植物这一步骤。

一般的植物和特定种类的树木具有从地下水中带走可溶性污染物的能力，这种能力形成了“植物分析”这一有趣而又有潜在用处的技术。从2000年开始，Don Vroblesky、James Landmeyer和Joel Burken三位博士首创并改良了这一技术，通过取出树心来分析其中树液的化学活力。对比研究显示，植物分析能够揭示地下水污染物的来源和走势，相较于传统测试和动力钻井，这种方法既节省成本又精确。

不包含湿地的植物生态修复技术是不完整的。为了治理污水，最晚从19世纪80年代开始，湿地技术开始不断地发展和改进。许多大型环境公司已经有能力分类、计划和建设人工湿地，以处理工业或城市污水。这是植物修复系统最强大和最常见的用途之一，这一系统可以同时实现多元化的环境目标，如有机物降解、金属整合，以及野生生物栖息地营造。

自最初讨论这些问题的会议开始（例如堪萨斯州立大学1992年主办的“植物对受污染土壤的有益影响”研讨会），到现在每年一度的国际植物生态修复技术学会年会，研究人员、顾问、监管人员和承包商会聚一堂，共同探讨这项技术的得失。这一领域经历了从

只有一个边缘概念，到成为被人们过度追捧的灵丹妙药，再到当前指向项目成功实施的合理预期（这种预期是建立在场地条件的基础上的）的巨大转变。

植物生态修复技术专家、风景园林师、场地设计师分享着共同号召起来创造的由植物层、土壤层和水层叠加建构而成的工具箱。通常建设一个场地会聘请两批专业人士——一批清洁“画布”，另一批则在场地竣工后做最后的润色工作。这本书提供了联通这两个任务范畴的桥梁，这样，修复土地终将成为场地设计的一部分。针对这一领域，每位专家都有自己独特而清晰的专业词汇，而这些词汇有着广泛而不同的来源，并且对应着各自的项目目标和最终期限。对于想了解该设计策略的风景园林师团体、科学家、工程师，这本书会帮助您克服言语障碍，实现专业互通。

种植既定的植物既不困难也不复杂，但是想通过种植得到一个特定结果可能需要几年甚至几十年，这就需要有足够的耐心和经验。两个领域的从业者都认识到，植物修复需要花费时间，尽管有时土地所有者和监管机构并不认同这一观点。

总之，在未来，植物生态修复技术及其应用前景广阔，将应对数量巨大的场地和宽泛的时间框架，而且这两者还在不断增长。设计师和科学家之间的协同合作有助于创建恰当的环境，从而扩大可用植物的范围和类型，同时，分阶段项目会随着时间的流逝开始证明植物生态修复技术的价值。

最后，植物生态修复技术是一项独特的技术，它使用精心挑选的植物、配植技术和创造性的设计方法来重新思考后工业时代的景观。它并不仅仅关注植物之美，也不关注毫无根据的场地规划设计和个人设计想法的创新，而是通过建立在植物特性之上的设计来隔绝、提取或降解土壤和地下水中的污染物。它致力于理解和涵盖科学研究的边缘领域，用创新方法去获取更广阔的科学边界。在这个奇妙的边界，基于植物的修复方法可以用于改良和更新，可以超越短期效应对当下的城市、乡镇和社区环境规划有一个更加长远的视野。

# 前言

从20世纪50年代开始，B级片就开始生动地描绘怪异植物来吓唬观众：“毒树”和“耐毒藤蔓”等来自外太空的植物以毒素为午餐，然后成为年轻人的小吃。在电影的结尾，人类用科学家英雄的智慧成功破坏了基因突变的绿色植物……但是最近，一些吸引人的标题出现了——“吃铅芥菜”、“一品脱大小的植物在强有力地对抗重金属”、“净化污染的杨属植物”，这些描述似乎把B级片带到了真实生活中，打破了我们对于植物安全友好的印象。然而，这些看似反常的植物实际上是我们的好朋友。

（科克伍德，2002）

对B级电影“毒树”和“耐毒藤蔓”的兴奋和期待也为“植物生态修复技术”（或简称“phyto”）这一领域的发展带来了广泛的积极作用。在面对当代环境污染时，有关此类植物的更多耸人听闻的方面被科学基础和实践应用所缓冲。然而，我们仍可以继续为植物内部、根际、周围土壤中的生态修复进程以及植物能为我们带来的益处而欣喜。

在短期或长期的土地规划中，植物生态修复技术的应用完全有能力在迁移城市土地污染物方面扮演主要角色，并在修复方面提供更加可持续性的选择。在一些案例中，植物能够吸收、降解或将污染物固着在土地中。然而笔者发现，植物生态修复技术背后的科学对于那些缺乏基础理论知识的读者来说是很难理解的，该技术也因此难以实施。本书的目的就是在这个领域搭建桥梁，用植物生态修复技术的现场应用和创造性场地设计，将批判性科学和与之相关联的工程技术连接起来。



## 1. 写作背景

本书出版的首要目的是阐释植物生态修复技术的空间设计、形态、结构和美学，而非仅仅简单描述其背后的科学原理。笔者的意图是转译科学家们进行的实验和田野研究，将其转化为对设计实践人员有用的形式，方便他们应对场地污染问题。本书的第1~3章是探究植物生态修复技术的科学和监管问题，包括特定场地污染物的本质特征和田野案例研究。第4~6章的重点是这些富有成效的植物类型与场地项目和特定污染物匹配时，潜在的环境、空间、文化和美学品质。

本书用图表阐释了科学原理怎样应用到植物生态修复功能中，植物生态修复什么时候能在场地应用中奏效，什么时候不能。笔者从事这一领域研究和现场实践的个人、科研机构和公司那里收集到大量的背景资料，其中包括了用于修复场地内经常出现的潜在污染物的相关植物种类的详细资料。附加的图表阐释了不同种类的项目场地（如加油站、公路廊道、铁路廊道）中的典型污染物。包含了此类场地项目处理策略的创新性的植物组合能提供兼顾美学和社会功能的实践性设计理念。对某些场地项目进行预防性的种植，如铁路廊道、干洗店、公园和城市家庭，使风景园林设计能采用植物策略应对未来的潜在污染。这样，对于风景园林师和土地所有者而言，植物生态修复技术将成为一种突出的、预期的和创造性的工具，来为市民和有污染场地存在的社区创造属于风景园林的福利。

本书来源于两个领域。一方面，由于城市景观更新项目和环境工程实践，特别是棕地和污染地改造实践在持续不断增长，人们对于基于植物的生态修复在景观场地设计中应用越来越需要清晰的专业指导，而远期并非基于生态修复的植物配置也参与其中。另一方面，我们也希望以早期科学研究先驱的工作为基础的植物生态修复技术研究人员所做的工作能为人所理解，从而使这项技术在更广阔的范围内为利益相关者和参与者服务。本书是笔者过去15年的研究成果，这15年来我们围绕植物生态修复、植物选择实践、风景园林设计和监测的挑战、机遇和技术来改造后工业时代的土地和景观。

xix

## 2. 本书结构

本书结构如下。

第1章是植物生态修复技术的概述，及其在环境中的现有应用和未来前景，包括其定义的覆盖范围、主题演变过程、对其在现行法律框架下应用的讨论、对其效力的评论以及潜在的创新应用的概述。

第2章回顾了包含植物生态修复技术的科学流程的基础，并对这些流程作了摘要式简介，本章还述及土壤改良实践和植物栽培相关知识。

第3章为读者提供一个惯常用植物生态修复途径和植物选择来进行处理的污染物群组的调查，这些内容与接下来一章关于种植类型和在受污染场地上的应用相互关联。

第4章概述特定污染物和特定种植类型的内在联系，图解了18种不同的植物生态修复种植类型。

第5章将第4章详述的植物生态修复技术种植类型应用到16类常见土地利用项目中，