

GUOJI SHUIZIYUAN YICONG
国际水资源译丛
SHUIZIYUAN HUANJING
GUIHUA GUANLI
YU KAIFA

水资源环境
规划、管理
与开发

[加] Asit K. Biswas 等著

：徐成剑 译
：刘 晖



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国 际 水 资 源 译 丛

水资源环境
规划、管理
与开发

中

G. Biswas 等著

徐成剑 译
李晓凌 刘 晖



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是国际水资源译丛之一, 根据全球发达国家和发展中国家的水资源环境规划、管理与开发及其引起的环境问题处理等经验, 结合相关科研成果, 尝试以跨学科的分析 and 审视方法, 对全球水资源的科学、合理利用和可持续发展问题进行了详尽和深入的探讨。

该书共上、中、下三册, 涉及全球水资源环境规划、管理与开发的方方面面, 主要内容包括: 水资源开发与环境、有效管理水资源及相关环境资源的组织机构原则、水资源管理经济机制(定价、许可和市场)、社会影响、移民安置、土地利用、侵蚀和水资源、泥沙、渍涝和盐碱化、地下水与环境、废水利用、水质监测、水质预测及管理、富营养化、内陆渔业、水生杂草等。

本书内容丰富, 视野开阔, 理念新颖、超前, 可供从事水资源规划、管理等研究的科研人员、管理人员以及高等院校相关专业的师生阅读参考。

Biswas Asit

Water Resources: Environmental Planning, Management, and Development
9780070054837

Copyright © 1997 by The McGraw-Hill Companies, Inc.,

北京市版权局著作权合同登记号: 图字 01-2011-5327

图书在版编目(CIP)数据

水资源环境规划、管理与开发: 全3册 / (加) 比斯瓦斯等著; 程丽君等译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 11

(国际水资源译丛)

ISBN 978-7-5084-9130-1

I. ①水… II. ①比… ②程… III. ①水资源管理②水环境—环境管理 IV. ①TV213.4②X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第222033号

书 名	国际水资源译丛 水资源环境规划、管理与开发(中)
著 者	[加] Asit K. Biswas 等著
译 者	黄家文 徐成剑 李晓凌 刘晖 译
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 24.625印张(总) 662千字(总)
版 次	2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
总 定 价	98.00元(上、中、下)

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

水资源环境规划、管理与开发

翻译委员会

主 任 刘 宁

副主任 马建华

委 员 (以本书组织翻译及译校单位为序)

张华忠 周运祥 (长江水利委员会长江工程监理咨询有限公司)

仲志余 张 惠 (长江水利委员会长江勘测规划设计研究院)

常剑波 陈文祥 (水利部中国科学院水工程生态研究所)

王方清 彭 彪 (长江水利委员会水资源保护局)

学术顾问 王 浩 翁立达 方子云 王子健

策划、组织、统稿 李玉珍

译校审

程丽君	宋金木	李军朝	马志刚	黄家文	徐成剑
李晓凌	刘 晖	赵先富	米玮洁	胡 俊	洪 峰
李嗣新	章贤方	余继承	陈金生	余 勇	章国渊
陈 宇	刘 浩	熊 军	涂修海	周 彬	郑 丰
刘子慧	黄灿璨	万小琼	黄建和	刘江壁	刘 辉
钱卓洲	常汉生	柯学莎	许全喜	范 杰	刘 晖
梁友光	张 曦	廖奇志	马 力		

目 录

序

译者的话

前言

上 册

1 水资源开发与环境	1
1.1 概论	1
1.2 全球水资源概况	2
1.3 水资源危机	6
1.4 环境和水资源管理	13
1.5 可持续发展	14
1.6 环境评估框架的局限	19
参考文献	36
2 有效管理水资源及相关环境资源的组织机构原则	38
2.1 水资源和环境资源组织管理体系的特点	38
2.2 资源管理的基础	52
2.3 政府及非政府实体的职责和组织	60
2.4 非政府组织担当的角色	75
2.5 资源管理的经费	80
2.6 改革	86
参考文献	87
3 水资源管理经济机制（定价、许可和市场）	89
3.1 政府参与水资源分配	89
3.2 水资源的有效分配	93
3.3 定价的有效性和用水许可	105
3.4 通过市场途径管理水资源	117
3.5 结论	126

附件 A 水资源管理中的任意获取问题	127
附件 B 水资源的稀缺性和时际分配	129
附件 C 不确定性与时际分配	131
参考文献	133
4 社会影响	138
4.1 定义	141
4.2 数量和知识	142
4.3 其他受项目影响人群案例分析	150
4.4 受项目影响人群和抵制运动	158
4.5 帮助受影响人群成为项目受益者	160
4.6 结论和教训	176
4.7 致谢	180
参考文献	181
5 移民安置	189
5.1 非自愿移民安置目标	190
5.2 非自愿移民安置规模 and 影响	191
5.3 非自愿移民安置的资助问题	196
5.4 移民安置现状	199
5.5 探析移民安置持续不成功的原因	203
5.6 提高生活水平使移民获益	220
5.7 研究和监测	228
5.8 结论	229
5.9 致谢	230
参考文献	230

中 册

6 土地利用、土壤侵蚀和水资源	237
6.1 人、土地、水资源简况	237
6.2 农业和林业用水	238
6.3 耕地和牧场水土流失	239
6.4 水土流失过程	243
6.5 影响水土流失的因素	244

6.6	土壤侵蚀、水与生产力的降低	249
6.7	侵蚀模型及水土流失对农作物生产量的影响	254
6.8	水土流失损失	256
6.9	侵蚀控制和保水	263
6.10	结论	264
	参考文献	266
7	泥沙	277
7.1	泥沙学情况简介	277
7.2	河流形态学	277
7.3	泥沙特性	281
7.4	床面形态	285
7.5	泥沙输移	291
7.6	产沙量	296
7.7	水库淤积	297
	参考文献	300
8	渍涝和盐碱化	304
8.1	全球渍涝和盐碱化概况	304
8.2	渍涝和盐碱化的发生	305
8.3	盐渍土的特点	308
8.4	灌溉地的水盐平衡	309
8.5	土壤盐碱度变化预测	312
8.6	水涝、土壤盐碱度和农作物产量	315
8.7	盐渍土的垦殖	318
	参考文献	320
9	地下水与环境	323
9.1	地下水概述	323
9.2	地下水环境问题	334
9.3	地下水环境评价	353
9.4	地下水管理	378
	参考文献	403
10	废水回用	411
10.1	废水回用概述	412
10.2	废水回用规划	417
10.3	废水回用类型及案例	428

10.4 废水回用微生物健康风险评估	459
参考文献	463

下 册

11 水质监测	471
11.1 水质监测定义	473
11.2 监测方案的组成	480
11.3 质量保证和质量控制	494
11.4 发展中国家的水质监测进展	497
11.5 全球范围的水质监测	500
11.6 结论与建议	503
参考文献	503
12 水质预测及管理	508
12.1 模型选择及其复杂性	511
12.2 水质模型的分类	512
12.3 水质模型的水力学参数	514
12.4 整个水资源系统的一维水质模拟	524
12.5 水质反应模拟——几种扩展	527
12.6 模式发展与求解程序（实例说明）	534
12.7 模型校准和评估	542
12.8 水质模型应用	544
参考文献	546
13 富营养化	551
13.1 富营养化研究的主要特征	552
13.2 营养状况与富营养化	554
13.3 世界范围湖泊和水库的富营养化	570
13.4 富营养化模型	603
13.5 湖泊恢复战略（实现湖泊流域系统的良好管理）	612
13.6 致谢	618
参考文献	618
14 内陆渔业	653
14.1 内陆渔业与水产养殖现状	654

14.2	水生资源的环境威胁	656
14.3	环境退化和渔业的区域性问题	664
14.4	渔业保护与改善措施	671
14.5	渔业前景展望	679
14.6	资源的综合管理	681
14.7	致谢	682
	参考文献	682
15	水生杂草	699
15.1	杂草问题的范围	699
15.2	水生杂草引发的问题	701
15.3	水生杂草的分类	703
15.4	水生杂草的控制方法	705
15.5	综合杂草控制技术	738
15.6	水生杂草的利用	740
15.7	结论和讨论	744
	参考文献	745



土地利用、土壤侵蚀和水资源

David Pimentel, C. Harvey, P. Resosudermo,
K. Sinclair, D. Kurg, M. McNair, S. Crist,
L. Shpritr, L. Fitton, R. Saffouri, R. Blair
(康奈尔大学; 农业与生命科学学院; 纽约伊萨卡)

6.1 人、土地、水资源简况

在陆生生态系统中, 淡水资源对人类和其他所有生物物种至关重要。全部物种中大约有 $3/4$ 的物种与陆生环境有关, 其余物种则与海洋和其他水生生态系统有关 (Pimentel 等, 1992 年)。所有生命都需要水, 且其生命体含有 $60\% \sim 95\%$ 的水。

人类所需食物 99% 来自于土壤和淡水, 由于降雨和风力所造成的水土流失正在使可耕种土地减少, 而可耕种土地的减少正在严重威胁着人类社会的食物系统 (Pimentel 等, 1994 年)。

为了满足全世界将近 60 亿人对食物的不同需求, 人均大约需要 0.5hm^2 的耕地 (Lal, 1989 年), 然而目前人均可耕地面积只有 0.27hm^2 ; 而 40 年后这一数字将降至 0.14hm^2 (Pimentel 等, 1994 年)。

在许多地区, 土地的流失是造成食物短缺和营养不良的主要原因 (WRI, 1992 年; Pimentel, 1993 年)。而目前超过 10 亿人 (约占全世界人口的 20%) 营养不良 (世界银行, 1993 年; Speth, 1994 年)。随着人类人口以每天 25 万人的数量增加和水土流失的加剧, 这种日益恶化的食物短缺和营养不良问题正在世

界各地引发动荡和混乱 (Giampietro 和 Pimentel, 1993 年; Gore, 1994 年)。

按照目前的人口增长速度, 2050 年世界人口将达到 150 亿, 2100 年将达到灾难性的 400 亿, 到那时地球每天将增加 200 万人口。许多顶级科学家和公共组织对人口的快速增长和由于庞大的人口规模及人类活动造成的自然资源枯竭和环境恶化深感忧虑 (CEQ, 1980 年; Keyfitz, 1984 年; Demeny, 1986 年; Hardin, 1986 年; Ehrlich, 1990 年; Holdren, 1992 年)。由于人口增长和基本资源的枯竭所导致的环境恶化, 将降低人类的生活质量, 缩减人类个体自由选择的空间 (Durning, 1989 年; 德哈姆, 1992 年)。目前全世界 12 亿 (Durning, 1989 年) ~ 20 亿人 (V. Abernethy, Vanderbilt 大学, 《个人电脑》1992 年) 生活在贫困、营养不良、疾病和短寿命之中。其中, 美国大约 3600 万人生活贫困, 而且, 这个数量每天还在继续增加 (US-BC, 1993 年)。

本次评估的目的是研究水土流失如何使作物减产, 并评价其对环境和经济的影响。此外, 还对全球保水保土的各种农作技术和实践进行分析探讨。

6.2 农业和林业用水

农业、林业和工业用水是人类生活用水的 13 倍之多。美国人均日综合用水量为 4900L (Pimentel 等, 1994 年), 中国仅为 1200L, 或者说仅为美国的 1/4 (温大宗, 中国沈阳应用生态研究所, 《个人电脑》1992 年)。全球人均日用水量大约为 1800L (WRI, 1991 年)。

农业生产消耗的淡水比任何其他人类活动所需淡水都要多 (Falkenmark, 1989 年)。全世界大约 87% 的淡水被农业所消耗 (无法回收) (Postel, 1992 年), 而在美国, 这个数字为 85% (NAS, 1989 年)。仅仅在作物生长季节, 玉米就蒸发 420 万 L 水 (Leyton, 1983 年)。这部分水和从田间蒸发的水是不可回

收的。

林业的用水量很少。仅仅在城市和郊区才会取水浇灌树木。因此，大部分的淡水为农业所消耗。

尽管从某种意义上讲，水是可再生资源，但也是有限的资源。降雨每年都发生，但是，地球上每个地区的降雨量有限。这意味着供给每个人的水量随着人口的增加而减少。目前，由于人口增加了 18 亿，全世界的人均可用水量比 1970 年减少了 33% (Postel, 1992 年)。Veltrop (1991 年) 预计，当世界人口增长 20% 时，对水的需求将翻一番，从而进一步加剧当今世界的水短缺形势。

一些国家水供给能力已经低于社会可持续发展对水的基本需求。一般来说，当人均日可用水量降至 2740L 时，那么这个国家就被认为是缺水国家，食物生产、工业以及环境保护等方面均存在水短缺情况 (Falkenmark, 1989 年)。目前，全球人均日可用水量仅为 1800L，处于严重的水短缺状况，水已不能满足人类的基本需要 (Pimentel 等, 1994 年)。

例如在埃及，实际上没有降雨，几乎全部 (97%) 依赖上游邻国的来水 (Gleick, 1993 年)。非洲其他国家也遭受着严重的缺水之苦，而这些国家有着世界上最高的人口增长率 (PRB, 1993 年)。据 Piel (1994 年) 报道，马拉维的人口每 13 年就翻一番。

在中东的 14 个国家中，9 个国家已经面临着明显的水短缺问题 (Postel, 1992 年)，其中 6 个国家的人口预计在 25 年内翻一番，这将使水短缺问题进一步加剧。此外，中东的所有河流几乎都由多个国家共享。这意味着水权紧张局势是该地区的一个主要政治问题。10 年内该地区将会由于水权引发暴力冲突 (Postel, 1992 年)。

6.3 耕地和牧场水土流失

6.3.1 全球土壤侵蚀模数

在全世界的农业用地中，大约 1/3 土地用于农作物生产，余

下 2/3 的土地用作畜牧牧场（美国农业部，1989 年；WRI，1992 年）。全世界大约 80% 的农业用地遭受着中度到强度侵蚀，10% 的农业用地遭受着轻度到中度侵蚀（Speth，1994 年）。耕地和牧场很容易受侵蚀，但是，由于耕地不断被翻耕，且没有植被覆盖，使其很脆弱，更容易发生水土流失。而且，全世界都在发生着自然侵蚀，特别是陡坡、贫瘠地和河床（Carson，1985 年；Troeh 和 Thompson，1993 年）。

尽管牧场的土壤侵蚀模数比耕地要低得多，但过度放牧的牧场土壤侵蚀模数也将达到 $100\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ （Lal，1993 年）。据估计世界上超过一半的牧场被过度放牧，并遭受着水土流失和退化（世界观察研究所，1988 年）。

水土流失问题在耕地上普遍发生，流失程度最高的是亚洲、非洲和南美洲 [$1 \sim 570\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 不等]，最低的是美国和欧洲 [$1 \sim 47\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]（见表 6.1）。尽管土壤类别和其容许流失量不同，但一般认为可承受的土壤侵蚀模数为 $1\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ （Hudson，1981 年；Lal，1984 年）。对国与国的平均土壤侵蚀模数进行比较，常常会产生错误导向，因为平均土壤侵蚀模数掩盖了各个地区土壤侵蚀模数的显著差异性。例如，非洲平均土壤侵蚀模数为 $20 \sim 40\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，然而，在很多东非地区土壤侵蚀模数达 $225\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之多（Lal 和 Stewart，1990 年）；同样，美国目前平均为 $17\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，但是，有些州如衣阿华州，平均土壤侵蚀模数为 $30\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ （美国农业部，1989 年）。

表 6.1 全球耕地平均土壤侵蚀模数

国 家	侵蚀模数 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$	提 供 者
阿根廷、巴拉圭、巴西	19	Barrows (1991 年)
澳大利亚	1~50	Edwards (1993 年)
比利时	10~25	Barrows (1991 年)
中国	30	Wen (1993 年)

续表

国 家	侵蚀模数 $t/(hm^2 \cdot a)$	提 供 者
英格兰	1~44	Arden-Clarbe and Evans (1993 年)
埃塞俄比亚	42	Hurni (1993 年)
印度	30	Khosho and Tejwani (1993 年)
意大利	0.2~47	Lal (1993 年)
科特迪瓦	60~570	Barrows (1991 年)
日本	1~28	美国农业部 (1989 年)
印度尼西亚 (爪哇)	60~120	Lal (1993 年)
肯尼亚	5~47	Barrows (1991 年)
马达加斯加	25~250	Barrows (1991 年)
尼泊尔	40	Barrows (1991 年)
尼日尔	35~70	Barrows (1991 年)
巴布亚新几内亚	6~320	Barrows (1991 年)
秘鲁 (安第斯)	20~70	Lal (1993 年)
波兰	1~4	Ryszkowski (1993 年)
泰国 (北部)	128	Napier 等 (1991 年)
美国	17	Napier 等 (1991 年)
津巴布韦	50	Barrows (1991 年)

即使这些土壤侵蚀模数相对较低,但仍远大于约 $1t/(hm^2 \cdot a)$ 的土壤形成速率 (即在 A、E 和 B 地层母质转化成土壤的速率) (Troeh 和 Thompson, 1993 年)。T 值 (土壤容许流失量) 范围为 $2 \sim 11t/(hm^2 \cdot a)$, 但是, 如 Troeh 和 Thompson 指出的, 这些 T 值比土壤形成和母质转化成土壤的速率要大得多。世界各地土壤侵蚀模数在未受扰动的森林地区最低, 为 $0.004 \sim 0.5t/(hm^2 \cdot a)$ (Bennett, 1939 年; Roose, 1988 年)。然而, 一旦林地转化成传统农业, 由于耕作、植被清除、过度放牧等, 土壤侵蚀模数就上升到 $750t/(hm^2 \cdot a)$ 以上 (Roose, 1988 年)。由

于世界人口仍在持续增长, 预计森林砍伐和土壤侵蚀模数还会继续增长 (Kendall 和 Pimentel, 1994 年)。

6.3.2 美国土壤侵蚀模数

在过去 200 多年的农作中, 由于水土流失、盐碱化和水涝等原因, 美国废弃了大约 $1 \text{ 亿 } \text{hm}^2$ (约 30%) 的耕地 (Bennett, 1939 年; Pimentel 等, 1976 年; 美国农业部, 1989 年)。与风蚀有关的土壤退化问题正在恶化, 而水蚀影响在下降 (美国农业部, 1971 年, 1989 年; Lee, 1990 年)。例如, 由于水蚀和风蚀共同侵蚀, 耕地土壤平均侵蚀模数达到 $17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 而牧场为 $6 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (美国农业部, 1989 年)。

美国大约 90% 的耕地正在以高于土壤形成速率 $1 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的速度流失土壤 (Hudson, 1982 年; Lal, 1984 年), 约 54% 的美国牧场 (包括联邦用地) 过度放牧, 加剧了水土流失 (Hood 和 Morgan, 1972 年; Byington, 1986 年)。水土流失加之盐碱化和水涝造成的土壤退化, 致使美国每年废弃近 $100 \text{ 万 } \text{hm}^2$ 的耕地 (Larson 和 Ventullo, 1983 年; 美国农业部, 1989 年; Soileau 等, 1990 年; Troeh 等, 1991 年)。废弃的、退化的耕地可被用做牧场或林地。

衣阿华州 (以下简称衣州) 有着世界上最肥沃的土地, 但在经过仅仅 150 年的农作之后, 就流失了其一半的表土 (Risser, 1981 年; Klee, 1991 年), 这很好地说明了水土流失造成的巨大损失。衣州还在以 $30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的警界速度流失表土, 这个速度约是土壤形成速度的 30 倍 (美国农业部, 1989 年)。在过去的 100 年里, 美国西北部富饶的帕卢斯地同样也流失了大约 40% 的表土 (农业研究, 1979 年)。

在过去的 50 年里, 美国农业部水土保持司试图控制水土流失的工作收效甚微 (OTA, 1982 年; NAS, 1989 年; Lee, 1990 年; Pimentel, 1990 年; 1993b)。这是因为实施安居计划、专业化种植农作物、采用单一耕作方式、放弃轮作以及使用大型重型农业机械等, 导致水土流失速度加大。随之而来的是农场数

量减少，规模变大，单个农场得以建立，机械化程度提高（美国农业部，1992年）。

在过去的50年中，农场的平均规模翻了一番还多，从90hm²增加到190hm²（美国农业部，1967年，1992年）。为了建设更大的农场和农地，曾经保护土壤不受侵蚀的草带、防护林带和灌木丛等被拆除，致使土壤裸露，从而发生风蚀、水蚀（Lal，1976年，1984年；Quansah，1981年；El-Swaify等，1982年；Hudson，1982年；Elwell，1985年）。由于大农场专业种植一种或两种农作物，如玉米和大豆，每年总有一段时间土壤缺乏植被覆盖，进一步加速了土壤侵蚀。农作物种植的专一化导致了大型机械设备的使用，有时会对整个土壤生态系统造成更大的损害（Buttel，1982年；OTA，1982年）。

现代农作实践正在加重水土流失问题，然而，当前土壤危机还有同样重要的因素就是农场主和政府没能认识到这个问题的严重性并加以解决。水土流失被农场主忽视，这是因为很难在一次暴雨甚至是一个季节能目测到水土流失的情况（Troeh等，1991年；Stocking，1994年）。一般来说，一次暴雨每公顷土地流失15t的土壤，即大约1mm厚的土壤层，是人类无法用肉眼观察到的损害。由于其隐蔽性，政府忽视了侵蚀问题，也就是说，没有发生大的危机是由于土壤是慢慢地、悄悄地一年一年流失的。

6.4 水土流失过程

由于降雨、风，或两者的共同作用，使能量传递而致土壤运动，进而形成土壤侵蚀过程。尽管土壤侵蚀的影响不容易每天都能观察到，但是，水和风两者都能很快地损害土壤。雨滴打击裸露的土壤，产生爆炸性影响，将土壤颗粒带到空气中。比如，雨滴降落能量仅在密西西比州就相当于每年近10亿t的TNT（NAS，1993年）爆炸能量。在坡耕地上，超过一半的土壤在飞溅的雨滴中被带到山下。在大多数地方，溅蚀和片蚀是主要的侵蚀形式（Allison，1973年；Foster等，1985年）。当降雨强度

大、发生快速大径流时，将形成 1~100m 深的冲沟，大量的水土被冲走（Lal 和 Stewart，1990 年）。

当风速不小于 25mi/h 时，土壤颗粒将脱离无保护的土壤，随风飘落到千里之外。例如，非洲侵蚀土地上的土壤颗粒随风飘落到遥远的巴西和佛罗里达（Simons，1992 年），而中国的土壤则在夏威夷被检测到（Parrington 等，1983 年）。

6.5 影响水土流失的因素

6.5.1 坡度

由于坡度越大越便于水流和土壤移动，陡坡耕地上的土壤侵蚀急剧增大（图 6.1）。这并不令人惊讶，因此，在山区，如东南亚的喜马拉雅山和南美的安第斯山有着世界上最高的土壤侵蚀模数。在菲律宾，超过 58% 的土地坡度大于 11%；而在牙买加，52% 的土地坡度大于 20%，同样均有着很高的土壤侵蚀模数（Lal 和 Stewart，1990 年）。

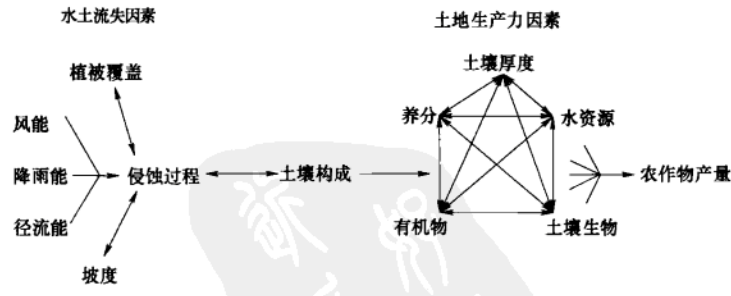


图 6.1 水土流失与生产力相互关系简单模型

注：降雨和风的能量启动了流失过程，如降雨产生径流和风产生悬浮物。坡度、植被、土壤构成等因素影响侵蚀过程，同时也受它们的影响。

历史上，在陡坡地区进行农作的情况往往是由于可耕地奇缺的地区才会出现。然而现在，由于日益增长的人口压力及土地退化，陡坡从森林用地转变成农业用地已属很正常的情况（Lal