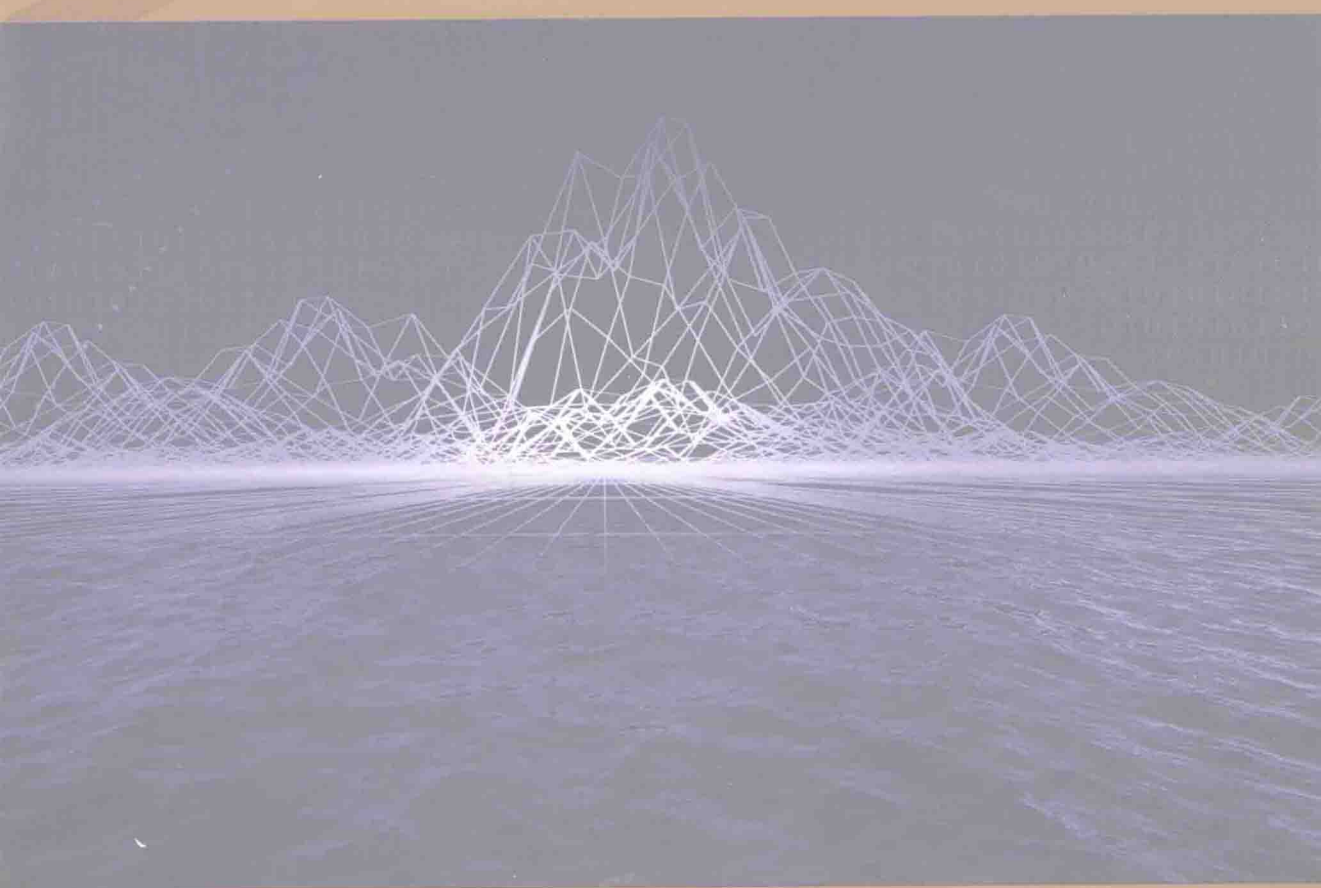


*The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology*

27

数学模型在生态学 的应用 及 研究

| 杨东方 陈 豫 编著



 海运出版社

数学模型在生态学的应用及研究(27)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(27)

杨东方 陈 豫 编著

海洋出版社

2014 年 · 北京

内 容 提 要

通过阐述数学模型在生态学的应用和研究,量化地展示生态系统中环境因子和生物因子的变化过程,揭示生态系统的规律和机制,以及其稳定性、连续性的变化,使生态数学模型在生态系统中发挥巨大作用。在科学技术迅猛发展的今天,通过该书的学习,可以帮助读者了解生态数学模型的应用、发展和研究的过程;分析不同领域、不同学科的各种各样生态数学模型;探索采取何种数学模型应用于何种生态领域的研究;掌握建立数学模型的方法和技巧。此外,该书还有助于加深对生态系统的量理解,培养量化研究生态系统的思维。

本书主要内容为:介绍各种各样的数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、水文和水动力,以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及数学模型应用的意义。

本书既适合气象学、地质学、海洋学、环境学、生物学、生物地球化学、生态学、陆地生态学、海洋生态学和海湾生态学等有关领域的科学工作者和相关学科的专家参阅,也适合高等院校师生作为教学和科研的参考。

图书在版编目(CIP)数据

数学模型在生态学的应用及研究. 27/杨东方,陈豫编著. —北京:海洋出版社,2014. 7
ISBN 978-7-5027-8874-2

I. ①数… II. ①杨… ②陈… III. ①数学模型-应用-生态学-研究 IV. ①Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 102537 号

责任编辑:鹿 源

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京华正印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:20

字数:480 千字 定价:60.00 元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《数学模型在生态学的应用及研究(27)》编委会

主 编 杨东方 陈 豫

副主编 李铁军 常彦祥 丁建伟 王凤友 苗振清

编 委 (按姓氏笔画为序)

尤炬炬 邓 婕 石 强 冯志纲 朱四喜

孙静亚 杨丹枫 杨佩华 吴有富 张玉荣

周 燕 胡益峰 贺华中 徐焕志 黄 宏

数学是结果量化的工具

数学是思维方法的应用

数学是研究创新的钥匙

数学是科学发展的基础

杨东方

要想了解动态的生态系统的基本过程和动力学机制,尽可从建立数学模型为出发点,以数学为工具,以生物为基础,以物理、化学、地质为辅助,对生态现象、生态环境、生态过程进行探讨。

生态数学模型体现了在定性描述与定量处理之间的关系,使研究展现了许多妙不可言的启示,使研究进入更深的层次,开创了新的领域。

杨东方

摘自《生态数学模型及其在海洋生态学应用》

海洋科学(2000),24(6):21-24.

前 言

细大尽力,莫敢怠荒,远迹辟隐,专务肃庄,端直敦忠,事业有常。

——《史记·秦始皇本纪》

数学模型研究可以分为两大方面:定性和定量的。要定性地研究,提出的问题是“发生了什么”,或者“发生了没有”;要定量地研究,提出的问题是“发生了多少”,或者“它如何发生的”。前者是对问题的动态周期、特征和趋势进行了定性的描述,而后者是对问题的机制、原理、起因进行了定量化的解释。然而,生物学中有许多实验问题与建立模型并不是直接有关的。于是,通过分析、比较、计算和应用各种数学方法,建立反映实际的且具有意义的仿真模型。

生态数学模型的特点为:(1)综合考虑各种生态因子的影响。(2)量化描述生态过程,阐明生态机制和规律。(3)能够动态地模拟和预测自然发展状况。

生态数学模型的功能为:(1)建造模型的尝试常有助于精确判定所缺乏的知识和数据,对于生物和环境有进一步定量了解。(2)模型的建立过程能产生新的想法和实验方法,并缩减实验的数量,对选择假设有所取舍,完善实验设计。(3)与传统的方法相比,模型常能更好地使用越来越精确的数据,从生态的不同方面取得材料集中在一起,得出统一的概念。

模型研究要特别注意:(1)模型的适用范围:时间尺度、空间距离、海域大小、参数范围。例如,不能用每月个别发生的生态现象来检测1年跨度的调查数据所做的模型。又如用不常发生的赤潮的赤潮模型来解释经常发生的一般生态现象。因此,模型的适用范围一定要清楚;(2)模型的形式是非常重要的,它揭示内在的性质、本质的规律,解释生态现象的机制、生态环境的内在联系。因此,重要的是要研究模型的形式,而不是参数,参数只是说明尺度、大小、范围而已;(3)模型的可靠性,由于模型的参数一般是从实测数据得到的,它的可靠性非常重要,这是通过统计学来检测。只有可靠性得到保证,才能用模型说明实际的生态问题;(4)解决生态问题时,所提出的观点,不仅要用数学模型支持这一观点,还要用生态现象、生态环境等各方面的事实来支持这一观点。

本书以生态数学模型的应用和发展为研究主题,介绍数学模型在生态学不

同领域的应用,如在地理、地貌、气象、水文和水动力,以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。认真掌握生态数学模型的特点和功能以及注意事项。生态数学模型展示了生态系统的演化过程和预测了自然资源可持续利用。通过本书的学习和研究,促进自然资源、环境的开发与保护,推进生态经济的健康发展,加强生态保护和环境恢复。

本书获得贵州民族大学出版基金、“贵州喀斯特湿地资源及特征研究”(TZJF-2011年-44号)项目、“喀斯特湿地生态监测研究重点实验室”(黔教全KY字[2012]003号)项目、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0659)项目、“西南喀斯特地区人工湿地植物形态与生理的响应机制研究”(黔省专合字[2012]71号)项目、“复合垂直流人工湿地处理医药工业废水的关键技术研究”(筑科合同[2012205]号)项目、浙江海洋学院出版基金、海洋公益性行业科研专项——浙江近岸海域海洋生态环境动态监测与服务平台技术研究及应用示范(201305012)、浙江省海洋水产研究所承担的“海洋渔业环境与污染应急监测技术研究团队建设(2012F20026)”和“三门核电站周边海域生态环境和渔业资源现状评价研究(2012C13005)”项目以及国家海洋局北海环境监测中心主任科研基金——长江口、胶州湾、浮山湾及其附近海域的生态变化过程(05EMC16)的共同资助下完成。

此书得以完成应该感谢北海环境监测中心崔文林主任、上海海洋大学的李家乐院长、浙江海洋学院吴常文校长以及贵州民族大学张学立校长;还要感谢刘瑞玉院士、冯士筭院士、胡敦欣院士、唐启升院士、汪晶先院士、丁德文院士和张经院士。诸位专家和领导给予的大力支持,提供良好的研究环境,成为我们科研事业发展的动力引擎。在此书付梓之际,我们诚挚感谢给予许多热心指点和有益传授的其他老师和同仁。

本书内容新颖丰富,层次分明,由浅入深,结构清晰,布局合理,语言简练,实用性和指导性强。由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,望广大读者批评指正。

沧海桑田,日月穿梭。抬眼望,千里尽收,祖国在心间。

杨东方 陈 豫

2014年5月8日

目次

林地的径流产沙模型	(1)
外来种的细胞化感模型	(6)
鸟类的多样性公式	(10)
植物物种的多样性公式	(13)
森林生态价位的分级模型	(15)
柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列差异模型	(18)
土地利用的马尔可夫模型	(21)
树种多样性的加性分配模型	(25)
微根管的细根动态模型	(28)
磷的植物响应模型	(31)
海域环境质量的评价模型	(34)
生态的多样性模型	(37)
温室番茄的分配与产量模型	(41)
玉米的双涌源能量模型	(46)
土壤有机碳的储量及分布模型	(51)
黄土土壤的侵蚀模型	(53)
种群的竞争模型	(57)
城市生态系统的评价模型	(60)
小花蝽的捕食模型	(65)
填埋场的温度空间模型	(68)
水稻茎蘖的动态模型	(72)
林冠的降雨截留量模型	(75)
景观的空间格局模型	(78)
沙化草地的景观结构公式	(81)
多尺度的景观影像模型	(85)
树的光响应模型	(89)
水稻干物质的积累与分配模型	(92)
水稻的水分利用模型	(96)

林冠持水的能力模型	(99)
玉米生长的低温冷害模型	(101)
流域水文的电导率模型	(104)
农田化肥施用量模型	(106)
内蒙古草原的水热通量模型	(110)
河网统计自相似性模型	(114)
冬小麦农田的蒸散量模型	(117)
植被生长季的变化模型	(119)
林冠层的二氧化碳源/汇强度模型	(122)
土壤水分的空间变异性模型	(126)
坡面土壤的水分入渗模型	(129)
菜园土壤的氮素解吸模型	(131)
香蕉树的耗水量公式	(133)
高温下土壤的热导率模型	(136)
干切牛肉的含水率公式	(140)
混合动力车的电磁耦合公式	(143)
稻谷的干燥发芽率模型	(145)
灌区水资源的模糊评价模型	(149)
土地资源数量演变模型	(154)
作物生长的敏感性模型	(157)
地下滴灌的流量公式	(161)
作物节水的潜力估算公式	(165)
地表蒸散的反演模型	(169)
耕地变化的预测模型	(174)
西宁市土地利用的预测公式	(177)
衬砌渠道的冻胀方程	(182)
履带车辆的差速转向公式	(187)
农村居民点的土地整理公式	(193)
焦糖色素的三维流动模型	(196)
温室采光性能的评价公式	(198)
水稻精播绳的制造公式	(201)
太阳能塑料大棚的蓄热公式	(205)

循环式谷物的干燥模型	(208)
轴流脱分的稻谷受力模型	(213)
秸秆的养分资源估算公式	(218)
水稻种子的弹跳公式	(221)
土地覆被的图像分类模型	(224)
番茄的茎节生长模型	(229)
种植面积的分层抽样公式	(232)
车辆翻车的运动方程	(234)
机器人侧摆关节的静态模型	(237)
泵性能的预测模型	(242)
黄土高原的土壤侵蚀公式	(245)
拖拉机的整机缓冲模型	(250)
冬小麦断根铲的结构公式	(253)
宁夏干旱的监测模型	(256)
锥齿轮的预紧力公式	(262)
动物的跟踪定位算法	(267)
排种器的图像处理公式	(271)
土壤水分的运动模型	(275)
耕地资源的评价公式	(278)
农网的无功优化模型	(281)
螺旋藻的热质传递模型	(286)
荒漠化的评价模型	(291)
棉花的需氮量模型	(295)
人工湿地的水平潜流模型	(299)
温室的蒸发蒸腾量模型	(302)

林地的径流产沙模型

1 背景

森林植被减少可以增加流域径流量、造林可以减少流域径流量,但其对流域径流量的影响幅度存在较大差异。坡面产流过程是降雨与土壤界面之间的响应过程。由于植被对降水再分配过程的影响以及降雨和地表土层入渗性能的时空变异,使得林地产流产沙过程研究较裸地困难得多。潘成忠等^[1]试图采用动态分析方法,通过对黄土高原地区两种典型水土保持林(次生山杨林和人工油松林)的降雨产流产沙过程进行分析。

2 公式

2.1 产流过程

2.1.1 坡面水量平衡

通常,林下降水首先被地被物层再次截留,剩余部分则以径流和入渗方式补予地表水和土壤水。次降雨坡面水量平衡方程为:

$$P = E + R + f(\text{荒地}) \tag{1}$$

$$P = E + R + I_c + I_l + I_s + f(\text{林地}) \tag{2}$$

式中, P 为次降水量; E 为蒸散量; R 为径流量,由于黄土高原地区土层深厚,这里主要指地表径流量; I_c 为冠层截留量; I_l 为枯枝落叶层截留量; I_s 为树干截留量; f 为入渗量。

2.1.2 林地截留

观测表明^[2],两种林地林冠截留量均随次降雨量的增大而增加,而截留率均随降雨量的增大而减小(表1),反映了林冠截留阈值的存在^[3]。在观测降雨量级范围内,山杨林和人工油松林的枯枝落叶层截留率差异较小,均在6.7%~28.7%之间变化,且均随降雨量增大而减小(表1)。

表1 人工油松林和山杨林不同降雨量级的截留率

降雨量级	林分类型	林冠截留率/%	枯枝落叶层截留率/%	总计/%
5.0~10.0	I	28.10	28.70	56.80
	II	21.31	26.50	47.81

续表 1

降雨量级	林分类型	林冠截留率/%	枯枝落叶层截留率/%	总计/%
10.1 ~ 20.0	I	18.82	17.40	36.22
	II	14.47	11.30	25.77
20.1 ~ 30.0	I	11.47	10.00	21.47
	II	12.00	11.73	23.73
30.1 ~ 40.0	I	9.65	7.60	17.25
	II	12.78	9.80	22.58
40.1 ~ 50.0	I	8.75	6.70	15.45
	II	12.00	8.56	20.56

注: I 为油松林 *P. tabulaeformis*; II 为山杨林 *P. dadidiana*.

根据表 1,采用模型 $I = \alpha P^m$ 对两种林分总截留率 I_t (%) 进行拟合:

$$I_t = 266.52P^{-0.761} \quad R^2 = 0.9895 \text{ (油松林)}$$
$$I_t = 101.971P^{-0.437} \quad R^2 = 0.8656 \text{ (山杨林)}$$

(3)

式中, I_t 为总截留率; P 为降雨量级。经检验,均呈显著水平,说明模型具有一定精度。为了便于计算,假定该模型可以进行外推。

2.1.3 坡面产流过程

由表 2 可知,林下净雨强($I_{\text{净雨}}$)小于表层稳渗率($f_{\text{表土}}$),则无地表径流产生。但对于林地的下层土壤,当 $I_{\text{净雨}} > f_j$,入渗受阻,首先可能产生壤中流。由于黄土的垂直节理,土壤水分侧向流动微弱,最后主要发展成表层流,也可称为饱和地面径流,说明林地在一定土层深度形成蓄满产流。

表 2 林地与荒山坡面不同土层土壤入渗性能

土层	土壤稳渗率/(mm · min ⁻¹)		
	A	B	C
0 ~ 10	8.82	7.42	0.50
10 ~ 20	7.70	1.81	0.65
20 ~ 40	2.70	1.10	0.45
40 ~ 60	0.75	0.63	0.30
60 ~ 80	0.38	0.53	0.25
80 ~ 100	0.25	0.37	0.20

注:A:山杨林地;B:人工油松林地;C:荒坡。

假设地表均匀、平坦,土层达到饱和时的最大吸水量可由下式计算:

$$h = h_{\pm}(\theta_0 - \theta_v) \quad (4)$$

式中, h 为吸水量 (mm); $h_{\pm}$ 为土层厚度 (mm); θ_0 为土壤饱和持水量; θ_v 为雨前土壤含水量, 其中 θ_0 和 θ_v 均以体积含水量表示, 这里取 $(\theta_0 - \theta_v) \approx 0.3$ 。

在黄土高原地区, 水土流失往往是由几场暴雨形成的, 根据上述林地截留和不同土层的入渗性能, 在不考虑坡度和地表结皮对降雨入渗的影响以及降雨过程对截留的影响下, 分析不同坡面的产流过程。当地面净雨强 $I_{\text{净雨}} > f_j$ (第 j 层土壤的入渗率) 且地面净雨量 $P_{\text{净}} > \sum_{i=1}^{j-1} h_i$

时, 才会有径流产生, 此时开始产流时间 (T) 为: $T = \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{h_i}{f_i} \right)$, 其中 h_i 为第 i 层土壤达到饱和时的吸水量 (mm); f_i 为第 i 层土壤的入渗率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); j 为 $I_{\text{净雨}} > f_j$ 的土层。

径流深 (h): $h_j = I_{\text{净}} \cos \theta - f_i$, 其中 θ 为坡度。

径流量 (Q): 若 $\left(P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^j h_i \right) \geq h_i$, 则

$$Q = \sum_{i=f}^m \left[\frac{h_i}{f_i} (I_{\text{净}} - f_i) \right]$$

若 $\left(P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^j h_i \right) < h_i$, 则

$$Q = \frac{P_{\text{净}} - \sum_{i=1}^f h_i}{I_{\text{净}}} \cdot (I_{\text{净}} - f_i)$$

2.2 产沙过程

2.2.1 径流剪切力与径流能量

径流在沿坡面运动过程中对土壤接触面产生径流冲刷力。它冲刷表层土壤, 破坏土粒结构和分散土粒, 从而为径流搬运提供侵蚀物质, 通常采用水力学中水流切应力表示:

$$\tau = \gamma R J \quad (5)$$

式中, τ 为切应力; γ 为水的容重; R 为水力半径, 一般取水深 h ; J 为水力坡度, 在坡度不大时, 一般取水流的下垫面地表坡度。

土壤侵蚀做功的能量来源于径流, 单位面积上的平均径流能量计算公式为^[4]:

$$E = \frac{\rho g}{4} L \sin 2\theta \cdot p_h \quad (6)$$

式中, E 为坡面单宽径流能量; L 为坡面长; p_h 为水层厚度, $p_h = \int_0^t (I_{\text{净}} - f) dt$, 其中 $I_{\text{净}}$ 为净雨强; f 为渗透率; ρ 为水密度; g 为当地的重力加速度; θ 为坡度。

2.2.2 径流产沙

从泥沙运动力学方面分析, 水流对泥沙的作用主要包括水流的剥蚀和搬运作用。由于

天然河流以及坡面流中泥沙的主要来源是悬移质,这里主要考虑坡面泥沙的悬移质挟沙力。

根据泥沙运动力学,泥沙的粒径与起动流速平方成正比,即 $v \propto d^{1/2}$,而泥沙的重量与其粒径的三次方成正比,因此径流移动泥沙的颗粒重量与起动流速的六次方成正比,即:

$$M = Cv^6 \quad (7)$$

式中, M 为径流移动泥沙重量; C 为流速系数; v 为径流起动流速。可见流速对泥沙的移动具有极其重要的意义。

明渠均匀流的 Chézy 公式和 Manning 公式:

$$\begin{cases} v = C \sqrt{RJ} \\ C = \frac{1}{n} R^{1/6} \end{cases} \quad (8)$$

式中, C 为谢才系数; n 为粗糙系数; R 为水力半径,一般取水深 h ; J 为水力坡度。

由式(8)可得:

$$V = \frac{1}{n} F^{1/2} h^{2/3} \quad (9)$$

目前较常见的水流挟沙能力计算公式为:

$$s = k \left[\frac{v^3}{ghw} \right]^m \quad (10)$$

式中, s 为径流挟沙浓度; h 为径流深; v 为径流流速; g 为当地的重力加速度; w 为泥沙的沉降速度; k 、 m 为根据实测资料所确定的经验系数。

由式(10)可以看出,径流的挟沙能力与流速、水深等有关。但由于缺乏各种植被径流小区泥沙资料,所以对式中系数的确定存在一定困难。考虑到森林植被作用而造成低含沙径流,可采用如下径流挟沙浓度公式^[5]:

$$s_v = k \cdot \frac{h^{2/3} J^{3/2}}{nw} \quad (11)$$

式中, k 为常系数。式(11)表明,在一定坡降下,由于森林植被使坡面糙率增大,水深减小,进而径流挟沙能力降低。比较式(9)和式(11)发现,挟沙力与流速成正比例关系。

2.2.3 坡面产沙过程

径流产沙与坡面流速密切相关,而流速主要由地表径流水深和糙率系数所决定。由于受到地表状况等多种因素的影响,不同土地利用类型的糙率系数各不相同。Zhang 等^[6]通过放水试验对油松和杨树林地的糙率进行了研究,表明杨树枯落物的糙率系数大于油松,且厚度对其影响的敏感性前者也大于后者,并建立了回归方程:

$$\begin{aligned} n &= 0.2143G^{0.3331} \text{ (油松)} \\ n &= 0.1073G^{0.4172} \text{ (杨树)} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, n 为糙率系数; G 为枯落物干重($g \cdot cm^{-2}$)。

由于林地糙率受地形、林木类型、密度、活地被层以及枯落物数量等多种因素影响,给林地糙率的确定带来很多困难。下面提出确定林地糙率的两种简便方法。

对于保护较好的天然林,枯落物厚度与林分密度具有一定关系,可用下式:

$$n_t = \frac{n_l}{p} \quad (13)$$

式中, n_t 为林地总糙率; n_l 为枯落物糙率; p 为枯落物层对总糙率的贡献率。

而对于密度、树龄等较为均一的人工林或进行间伐过的天然林,考虑人为因素对林地枯落物的影响,可把其对糙率的贡献看作一定值,即:

$$n_t = k + n_l \quad (14)$$

式中,除 k 为枯落物层外,林分其他部分对地表糙率的贡献,为一常数。

3 意义

潘成忠等^[1]总结概括了黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙模型,以黄土区两种常见森林植被(次生山杨林和人工油松林)长期定位观测试验为基础,从水量平衡和径流产沙机理出发,分析了次降雨条件下两种林地和荒地坡面产流产沙过程。为大尺度的流域研究奠定基础,进而推动森林植被的生态水文以及水土保持效应过程研究向纵深方向发展,同时为黄土高原地区森林植被恢复重建提供理论依据。

参考文献

- [1] 潘成忠,上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597 - 1602.
- [2] Yang WZ, Wu QX. Forest and Grassland Vegetation Construction and its Sustainable Development in Loess Plateau. Beijing: Science Press 1998.
- [3] Wang YH, Yu PT, Xu YD, et al. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation. J Beijing For Univ. 1998, 20(6): 25 - 30.
- [4] Zhao XG, Shi H. Impact of gentle slopeland flow on processes of soil particle detachment. J Mount Sci. 2002, 20(4): 427 - 431.
- [5] Fei XJ, Shu AP. Investigation on sediment transport capacity with high concentration for fluvial river. J Hydr Eng. 1998, 11: 38 - 43.
- [6] Zhang HJ, Kitahara Hikaru, Endo Taizo. The effect of several kinds of litters to the roughness coefficient. J Soil Water Cons. 1994, 8(2): 4 - 10.

外来种的细胞化感模型

1 背景

生物入侵是指某种生物从原来的分布区域扩展到一个新的地区,其后代可以繁殖、扩散并维持下去^[1]。外来杂草进入新的生境后,在其入侵过程中向环境释放化感物质是导致其入侵成功的一个重要方面^[2]。数学建模与模拟在种群动态变化的研究中起重要的作用。刘迎湖等^[3]通过应用 CA 模型,对具化感作用的外来杂草对本地种群落的入侵过程和入侵规律进行模拟研究。

2 公式

2.1 细胞空间的描述

采用二维自动机作为植物生长的空间。在没有外来种入侵之前,假设本地种群在一个 20×20 个正方形格子组成的方阵中生长,每个格子即细胞自动机模型中的细胞,用 $\alpha(i, j)$ 表示。整个方阵代表群落所占据的区域,设本地种对该区域的资源与空间的分配达到优化配置,物种间的相互作用也达到稳定状态,植物均匀分布在每个细胞空间中。另外,每个细胞也是种子储备的空间。只有当细胞内的个体死亡后,种子才可在空出来的细胞中产生新的个体。而且外来种和本地种同样适应该空间的一般生态条件。

现将方阵中处于左下角位置的细胞中心置于坐标系的原点,让细胞方阵的空间格局由平面上过点 $(i+0.5, 0)$ ($i = -1, 0, 1, 2, \dots, 19$) 作平行于 y 轴的一组平行线及过点 $(0, j+0.5)$ ($j = -1, 0, 1, 2, \dots, 19$) 作平行于 x 轴的一组平行线分割而成。细胞 α 用该细胞的中点代表,因而该分割而成的细胞空间可表达为: $\alpha | \alpha = (i, j)$, 其中 $i, j = 0, 1, 2, \dots, 19$ 。对于细胞 $\alpha(i, j)$ 的邻域 $V[\alpha(i, j)]$, 采用 Moore 型定义^[4], 即:

$$V[\alpha(i, j)] = \{V[\alpha(u, v)] \mid u - i \leq 1, |v - j| \leq 1, u, v \in \mathbf{Z}\} \quad (1)$$

2.2 细胞内个体生长的状况

新个体的补充由储存在细胞空间的种子库提供的种子萌发产生,设在该细胞空间中,物种 α 的种子数为 N_α ($\alpha = 1, 2, \dots, n$), 设同类种子中每颗种子发芽的概率相同, 为 f_α 。因此, 在一个空细胞中, 在不考虑化感作用的条件下, 空细胞被由 α 物种种子发芽产生的新个体所占据的概率 Q_α 为: