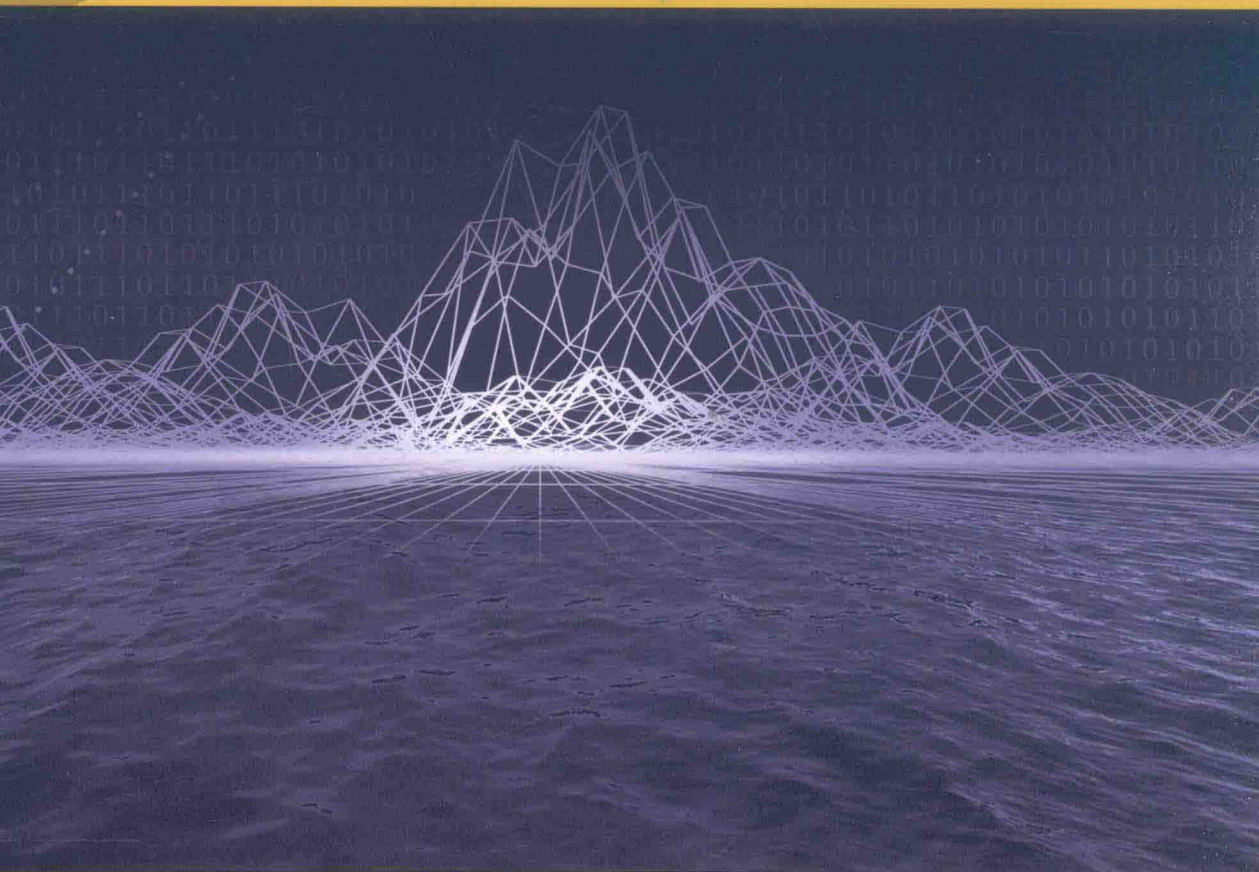


The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology

37

数学模型在生态学 的应用及研究

| 杨东方 陈 豫 编著



海洋出版社

数学模型在生态学的应用及研究(37)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(37)

杨东方 陈 豫 编著

海洋出版社

2017 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,定量化的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,培养定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其数学模型应用的意义。

本书适合气象学、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. 37/杨东方,陈豫编著. —北京:海洋出版社,2016. 12
ISBN 978-7-5027-9679-2

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(2017)第 046236 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

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 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.

《数学模型在生态学的应用及研究(37)》编委会

主 编 杨东方 陈 豫

副主编 王 涛 杨丹枫 林梦晓 黄 宏 王凤友

编 委 (按姓氏笔画为序)

马卫民 王 强 王志康 冯志纲 邓 婕

司玉娜 朱四喜 李将敏 李海霞 张晓龙

林晓明 赵子绮 徐 钺 常彦祥 曾 航

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。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)定量化描述生态过程,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,将从生态不同方面所取得的材料集中在一起,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,不能用每月的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,来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,不仅从数学模型支持这一观点,还要从生态现象、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,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。

本书获得西京学院的出版基金、贵州民族大学博点建设文库、“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”(黔教合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、贵州民族大学引进人才科研项目([2014]02)、土地利用和气候变化对乌江径流的影响研究(黔教合KY字[2014]266号)、威宁草海浮游植物功能群与环境因子关系(黔科合LH字[2014]7376号)、“胁迫迫下人工湿地植物多样性对生态系统功能的影响机制研究”(国家自然科学基金项目31560107)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主任姜锡仁研究员、上海海洋大学的院长李家乐教授、贵州民族大学校长张学立教授和西京学院校长任芳教授;还要感谢刘瑞玉院士、冯士筭院士、胡敦欣院士、唐启升院士、汪品先院士、丁德文院士和张经院士。诸位专家和领导给予的大力支持,提供的良好的研究环境,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

2015年5月8日

目次

区域水土流失的预测公式	(1)
山地林道网的土壤侵蚀模型	(4)
非饱和土壤的坡面产流模型	(7)
泥石流的地貌灾害预测模型	(10)
双裂蟹甲草的净光合速率模型	(14)
滑坡危险度的区划公式	(17)
小流域的侵蚀产沙模型	(20)
泥石流与江河水流的交汇流动方程	(23)
排导槽中泥石流的流速方程	(27)
县城迁建的选址模型	(30)
物种价值的系数计算	(33)
土质边坡的稳定性模型	(36)
阵性泥石流的周期性模型	(39)
滑坡变形的预测模型	(44)
土壤的退化程度模型	(47)
林地植被的生长判别函数	(50)
地类的损失面积公式	(53)
农户投资的效益公式	(56)
滑坡灾害的预测模型	(58)
风景区的景观格局模型	(60)
玉米叶片的几何造型函数	(62)
参考作物的蒸散量模型	(65)
渠道轮灌的优化配水模型	(68)
田间腾发量的计算模式	(72)
砂质夹层土壤的入渗计算	(76)
抛秧机的输秧运动方程	(79)

塔里木盆地的潜水蒸发公式	(82)
水稻的动态产量模型	(87)
发动机的调速特性模型	(92)
柴油机的自动控制模型	(96)
平整土方量的计算	(100)
斜齿圆柱齿轮的传动优化模型	(103)
温室环境的预测模型	(108)
颗粒饲料的热物性模型	(114)
土地利用的变化幅度公式	(118)
苹果的等级判别系统模型	(121)
坡面的入渗模型	(124)
果蔬呼吸的强度模型	(126)
皮棉的杂质纤维检测函数	(131)
排种器的护种模型	(135)
射阳港的工程潮位公式	(138)
集装箱船舶的抵港模型	(141)
桩柱周围的海底冲刷模式	(144)
海浪及水质点的运动模型	(147)
海浪谱的高阶谱矩计算	(151)
海上建筑物的硬化弹性模型	(154)
沿岸的搬运公式	(156)
高频的复介电常数计算	(159)
潮位潮流的模拟公式	(162)
沉箱的动力响应模型	(165)
波浪的周期方程	(167)
潮间浅滩的泥沙运移模型	(170)
含水层的对流弥散模型	(172)
海洋的固有光学特性方程	(174)
地质环境系统的评价模型	(176)
盐土壤的介电模型	(178)

负压桶的运动模型	(181)
海湾的固有振动周期公式	(184)
气候系统的吸引子模型	(186)
系泊工程的桩基计算	(188)
负压桶的桶基模型	(191)
联合播种机的播量公式	(193)
降雨影响的优先流公式	(195)
水草粉碎的预测模型	(197)
滴灌土壤的水分运动模型	(199)
履带车辆的液压功率公式	(202)
土壤水分的垂直变异模型	(205)
机滚船犁的转弯稳定模型	(208)
日光温室的适应性模型	(212)
土地利用的覆被空间模型	(214)
农业水资源的利用效率模型	(216)
核桃的脱壳模型	(219)
水稻叶片的气孔导度模型	(222)
水资源的潜水均衡方程	(225)
旋涡泵流道截面的流场方程	(228)
毛桃苗的嫁接模型	(231)
迷宫滴头的水力特性模型	(233)
灌水滴头的流体模型	(235)
灌区排水的控制模型	(237)
土地利用的可持续评价函数	(240)
驾驶室的声学灵敏度模型	(242)
豆芽棚的滑坡公式	(244)
风雪流的运动阻力公式	(250)
泥石流的预测模型	(253)
泥石流危险度的区划模型	(258)
泥石流暴发的规模模型	(261)

防护林的演替方程	(265)
洪涝灾害的区划公式	(269)
降雨与泥石流的关系式	(272)
滑坡和泥石流的危险度模型	(275)
山丘区匹配开发的评价公式	(279)
土粒度成分的分维公式	(284)
泥石流等级和灾度的划分公式	(287)
古乡沟泥石流的流速公式	(290)
土壤水分的变化公式	(293)
岩体的卸荷特性公式	(295)
山地的生态评价模式	(297)
森林植被的多样性公式	(300)
流域洪水的特征模型	(302)
泥石流的冲击模型	(305)
蔬菜基地的环境评价公式	(307)

区域水土流失的预测公式

1 背景

将大面积的水土流失作为一个专门的问题进行研究,最早源于区域土壤侵蚀图的制作以及区域环境治理的规划和决策需要。胡良军和邵明安^[1]引用相关方程对区域水土流失进行了研究,从理论的高度进行专门和系统的论述,并且工作的侧重点也有不同。在美国,主要是通过建立地面监测网络来获取全面的水土流失信息,然后经汇总和尺度转换来获得区域水土流失的宏观信息^[2]。在国内,作为土壤侵蚀水土保持学科的一个重要研究领域,区域水土流失的概念被专门提了出来,并从区域的宏观角度对其进行系统、综合的研究和论述^[3],但无论从理论还是实践上均不甚成熟,基本还处于研究的起步阶段。

2 公式

区域水土流失研究的发展及现状

新技术尤其是遥感和 GIS 等技术得到广泛应用。在 1:30 万 TM 卫星影像上,将综合影像地貌组合结构、植被覆盖等级、地面组成物质等特征相近的区域划分为一个单元。将影响土壤侵蚀的因子分为侵蚀因子和抗侵蚀因子两类。在分析各类因子作用的基础上,选取汛期降雨量、地面物质组成、植被盖度、沟壑密度、相对高差等指标,通过卫片判读,大比例尺(1:25 万)地形图、航片抽象等方式取得参数,并运用专家知识赋给每一因子以权重和分值,应用变权模糊数学模型进行半定量评判。其形式为:

$$P = (a + b + c + d) / [(a/R) + (b/G) + (c/Y) + (d/L)] \quad (1)$$

式中, R 、 G 、 Y 和 L 分别是降雨、地面物质抗蚀性、植被覆盖等级和地形等因子的分值; a 、 b 、 c 、 d 分别是上述各因子的权重; P 是计算所得侵蚀强度的分值。据总分值查表求得侵蚀强度。

该评判模型的建立过程,实质上就是因子分值和权重的确定过程,它的完成依赖于丰富的专家知识。类似的做法在北京市水土流失评价中有所体现^[4]。

区域水土流失的趋势预测或预警研究

在各类型区内,选择有代表性的河流和测站,根据该测站及其所控制流域内的有关资料,确定该流域内影响水土流失的各主要因子,建立起河流年输沙量与各影响因子间的相

关模型,进行各分区水土流失的趋势预测,最后据各分区的预测结果,分析全国的水土流失发展趋势。模型的基本形式为:

$$Y = a_1 M^{a_2} Q^{a_3} P^{a_4} \quad (2)$$

式中, Y 为河流年输沙量($\times 10^8$ t); M 为一日最大洪水量($\times 10^8$ m³); Q 是年径流量; P 是水土保持面积占流失面积百分数; a_1, a_2, a_3, a_4 为系数。

杨艳生在《区域性土壤流失预测方程初步研究》一文中^[5],阐述了利用 USLE 的建模思想,应用我国南方花岗岩侵蚀红壤区的径流小区观测资料和野外调查资料,同时根据我国南方流失区的实际,确定各项基本流失因子,推导出花岗岩母质的赣南侵蚀红壤区及长江三峡区的土壤流失预测方程。

赣南丘陵山区方程为:

$$y = 5.459 - 0.472x_1 + 0.128x_2 + 1.715x_3 - 14.041x_4 \quad (3)$$

$$A = 4y \cdot K \cdot LS \quad (4)$$

式中, y 为观测样区的坡面流失量; x_1, x_2, x_3, x_4 分别为降雨量、降雨强度、径流深度和径流系数; A 为区域坡面流失量 [$1/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; K 为可蚀性因子; LS 为地形因子。

长江三峡地区方程为:

$$A = 0.8351RKLSC^{-2.3} \quad (5)$$

$$LS = 0.0023 \cdot 1.1^\alpha \cdot h(1 - \cos\alpha) / \sin\alpha \quad (6)$$

式中: C 为植被度; α 为地面坡度; h 为相对高差(m)。该方程中的 R, K, LS, C 等参数,其含义与 USLE 基本相同,但在应用中均是按区域宏观指标来处理的。

蒋定生则采用“加权重叠排序方法”,对黄土高原腹地的 106 个县(旗)、市发生水土流失的危险程度进行了预警研究^[6]。其做法是,对研究区域进行分析和评价,建立一系列指标体系,通过对决定各县水土流失危险程度的综合因素进行动态排序,找出影响各样本区内水土流失程度的主要问题,并进行归类和预警。该研究所选择的排序因子有:雨侵蚀力 R 、土壤侵蚀模数 m 、坡耕地面积 F 、未治理的水土流失面积 F_0 、沙尘暴天数 n 、植被覆盖度 a 和土壤抗冲性 c 。其排序方法分两步:先根据各排序因子的计算结果,依按从大到小或从小到大的要求将各单因子进行排序;然后按加权重叠法进行综合排序。重叠排序指数按下式计算:

$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (7)$$

式中, A 为重叠排序指数; y_i 为参加排序样本数; x_i 为排序分指数(如 R, m, F, F_0, n, a, c 等); n 为重叠排序项目数。

专家权重模型,即将水土流失影响因素按其相对重要性进行排队,给出各因素所占的权重值。对每一要素再按内部的分类进一步排队,即按其内部重要性再一次给各类别赋予权重值(打分),从而得到各类因素影响水土流失的结果,最后进行系统复合,得出表示水土

流失影响程度的排序结果,作为决策依据。其数学表达式为:

$$G = \sum_{i=1}^m W_i C_{ij} \quad (8)$$

式中: G 为最终复合结果; W_i 为第 i 个因素的权重; C_{ij} 为第 i 个因素中第 j 类的专家评分值; m 为影响因素的个数。

3 意义

根据区域水土流失的计算公式,阐述了该领域的研究现状,指出了当前存在的主要问题,并对今后的研究发展方向进行了展望。区域水土流失研究结果的获取有从宏观出发和从微观出发的两种途径。随着水土流失研究水平的不断发展以及基础研究资料的日益积累和完善,区域水土流失研究必将在定量化、模型化和智能化等方面取得新的进展。

参考文献

- [1] 胡良军,邵明安.区域水土流失研究综述.山地学报,2001,19(1):6974.
- [2] Meyer L D.Evolution of the universal soil loss equation[J].Journal of soil andwater conservation,1984,39(2):99-104.
- [3] 郑粉莉.浅谈我国土壤侵蚀学科亟待加强的研究领域[J].水土保持研究,1999,6(2):26-31.
- [4] 王治堂,高林.北京郊区水土流失信息系统的建立与应用[J].水土保持学报,1989,3(2):1-9.
- [5] 杨艳生.区域性土壤流失预测方程的初步研究[J].土壤学报,1990,27(1):73-78.
- [6] 蒋定生.黄土高原水土流失危险程度预警研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1995,1(1):12-19.

山地林道网的土壤侵蚀模型

1 背景

作为人类开发利用森林资源的一项基础工程,林业道路网是实施森林可持续经营的物质基础,它在木材采运、森林经营管理以及资源综合利用等活动中都起着重要的作用,但同时也给森林生态系统带来一系列的负面效应^[1]。大面积的边坡挖填方、弃方和路面等工程创面,彻底改变了土层结构和土壤理化性质,并影响到植被的恢复,造成面蚀和沟蚀的发生^[2-3]。邱荣祖^[1]采用定点试验观测和面上调查相结合的方法,研究山地林道网对林地土壤理化性质、植被和土壤侵蚀的影响,以期揭示其影响的程度和机理,为最大限度减少林道网对林地环境的负面效应提供理论依据。

2 公式

根据美国通用土壤流失方程($E=RKLSCP$),影响土壤侵蚀量的因素有降雨侵蚀力指标(R)、土壤可侵蚀因子(K)、坡长因子(L)、坡度因子(S)、作物经营因子(C)和土壤保持因子(P)。在特定的研究区域,降雨特征、土壤质地和有机质含量相近,林道路面结构基本相同,且都无工程防蚀措施。因此,可近似地认为 R 、 K 、 P 一致,为使 C 因子也保持一致,分不同弃养年限进行调查,并假设同一年弃养的林道 C 值一样,这样,面上调查中影响土壤侵蚀量的因子仅限于坡长和坡度,表1是20条弃养4年内的便道不同坡度序列、不同坡长路面土壤侵蚀量调查统计数据。

表1 路面土壤累计侵蚀量 (cm³)

年限	坡度(%)	坡长(m)										
		4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
1	3.49	25 488	57 204	95 148	133 200	171 360	2 564 641					
1	6.98	89 280	222 900	324 500	451 100	602 700	865 100					
1	10.47	152 800	330 320	489 120	629 200	722 760	1 048 680	1 412 940	1 702 740	2 036 200	2 223 660	2 484 120
1	13.96	39 920	126 520	233 640	345 080	470 960	617 580	852 000				
2	3.94	26 660	64 740	114 240	206 240	271 740						
2	6.98	161 500	244 980	410 760	697 992	744 484	1 002 884	1 119 844	1 282 964			
2	10.47	132 780	274 760	351 720	554 800	829 520	1 064 328					

续表

年限	坡度(%)	坡长(m)										
		4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44
2	13.96	194 900	447 800	659 312	763 152	893 628	1 152 820	1 304 640	1 615 172	1 910 812	2 161 132	
3	3.49	18 400	102 800	188 420	275 260							
3	6.98	105 040	250 940	416 808	617 016	810 388	1 041 920	1 297 892	1 476 644	1 732 004	1 896 604	
3	10.47	104 396	216 984	409 416	685 148	1 013 448	1 231 560	1 425 908	1 670 004	2 302 132	2 498 524	
3	13.96	153 856	372 755	513 380	819 372	1 126 924	1 442 624	1 678 064	1 985 896	2 296 656	2 596 124	2 908 016
4	3.49	23 240	99 408	228 500	330 704	479 884	663 444	748 044	887 204	1 006 656	1 264 156	
4	6.98	159240	239 000	351 780	497 580	638 820	882 140					
4	10.47	172 708	472 868	781 468	913 168	1 186 068	1 500 048	1 893 088	2 425 988	2 736 968	3 164 468	3 575 428
4	13.96	67 936	217 272	442 088	725 528	938 552	1 345 792	1 760 552	2 193 312			

应用多元线性回归分析可得土壤侵蚀量 E 与弃养时间 T 、坡度 S 、坡长 L 的关系模型：

$$E = 1\,695.24T^{0.328}L^{1.354}S^{0.814} \text{ (cm}^3\text{)} \tag{1}$$

应用 F 检验, $F=504.13>F_{0.01}(3,125)=3.95$, 表明整个模型极显著相关。应用 t 检验, $t_1=5.609, t_2=47.274, t_3=20.026, t_1, t_2, t_3$ 均大于 $t_{0.01}(125)=2.41$, 时间、坡长和坡度分别与 E 极显著相关。

定点观测采用标桩法进行, 观测试验的林道是典型的沿溪布线方式, 研究路段为半填半挖结构, 林道纵坡度 $4.1^\circ(7.15\%)$, 桩标从林道纵坡变坡点(坡顶)往下布设 50 m, 共布设 25 对标桩。该段林道于 1995 年 8 月修好投入使用, 1996 年 10 月基本停止通行, 布桩时间为 1996 年 12 月, 观测读数时间为 1997 年 12 月, 因此可以认为观测的数据代表了林道路面弃养第 1 年的土壤侵蚀情况。

为检验由面上调查数据建立的林道路面土壤侵蚀数学模型的精度, 取 $S=7.15, T=1$, 式(1)化简为:

$$E = 8\,406.91L^{1.354} \text{ (cm}^3\text{)} \tag{2}$$

取 $L=2, 4, \dots, 50$, 可计算出预报值, 设标桩实测量为 E_0 , 相对误差为:

$$r_i = \frac{|E_0 - E|}{E} \times 100(\%) \tag{3}$$

计算结果表明, 平均相对误差为 12.27%(计算过程略)。因此, 用模型式(1)预报林道路面土壤侵蚀量, 其平均误差低于 20%的限差^[4], 满足预报精度要求。

3 意义

山地林道网对林地环境影响的定量研究是一个重要的却一直未被重视的领域。采用定点观测与面上调查相结合的方法, 定量研究山地林道网对林地土壤性质、土壤侵蚀量和