

土地利用/覆被变化分析方法研究

丑庆川¹, 胡涛¹, 何诗雨¹, 史秀华^{2*} (1. 深圳大学生命科学学院, 广东深圳 518060; 2. 深圳大学高尔夫学院, 广东深圳 518060)

摘要 土地利用/覆被变化一直以来都被认为是全球变化的重要组成部分和主要驱动因子之一, 近30年来, 越来越受到各国相关学者的普遍关注, 目前已成为国际学术界研究的焦点和重点。国内外学者基于不同的目的, 从不同的角度出发构建了大量模型, 以便深入了解土地利用/覆被变化的驱动因素和机制, 预测其未来发展变化趋势。该研究从土地利用速度、土地利用程度、土地利用变化趋势和土地利用的景观指数等方面研究土地利用动态变化的模型, 其中重点介绍当前应用最广泛的模型, 同时为土地利用/覆被变化模型的未来发展指明方向。

关键词 模型; 动态变化; 土地利用/覆被变化; 预测

中图分类号 S-03 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)10-301-04

Study on the Analysis Method of Land Use / Cover Change

CHOU Qing-chuan¹, HU Tao¹, HE Shi-yu¹, SHI Xiu-hua^{2*} (1. College of Life Science, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518060; 2. Golf College of Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060)

Abstract Land use / cover change is considered to be one of the important components and the main driving factors of global change, and increasingly concern by international organizations and countries around the world, has become the forefront of the international global change research. Domestic and foreign scholars from different angle build a large number of models, and in - depth understanding the causes and process of land use / cover change, predict the future development trends. The land use dynamic change model was studied mainly from land use speed, land use degree, land use change trend and the landscape index of land use and other aspects, which highlights the current most widely used model, at the same time points out the future development direction of the model.

Key words Model; Dynamic change; Land use / cover change; Prediction

土地利用/覆被变化(Land Use and Cover Change, 简称LUCC)包含两层不同却又密切相关的含义, 即土地利用和土地覆被^[1-2]。20世纪90年代以来, 土地利用/覆被变化被认为是全球变化的重要组成部分和主要驱动因子之一^[3], 越来越受到各国相关学者的普遍关注, 目前已成为国际学术界研究的焦点和重点^[4]。国际上自1993年国际科学联合会与国际社会科学联合会联合成立了土地利用/覆被变化核心项目计划委员会后, 一些积极参与全球环境变化的国际组织和国家纷纷跟进, 启动了各自的土地利用/覆被变化研究项目^[5]。

近年来国内学者也在土地利用/覆被变化方面做了大量研究^[6-17], 主要集中在土地利用/覆被变化状况的评估、土地利用/覆被变化的建模与预测、土地利用/覆被变化的集成技术研究、土地利用/覆被变化的驱动力研究、土地利用/覆被变化的景观生态学理念等方面, 从不同的角度出发构建模型, 深入了解土地利用/覆被变化的成因和过程, 预测未来发展变化趋势。笔者从土地的“过去-现在-未来”出发, 主要从土地利用速度、土地利用程度、土地利用变化趋势和土地利用的景观指数等方面重点介绍研究土地利用动态变化的模型。

1 土地利用速度

1.1 单一类型土地利用速度 单一类型土地利用速度又称土地利用类型的动态度, 是指某一时间范围之内研究区域内一种土地利用类型的数量大小变化情况^[3, 18-24], 其表达式为:

$$R = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, R 指某一时间范围内某一土地利用类型的利用速度; U_a 、 U_b 分别指研究初期、研究末期某一土地利用类型的土地利用数量; T 是研究的时间跨度, 当 T 以年记时, R 值就是某种土地利用类型的年变化率。

1.2 综合土地利用速度 综合土地利用速度又称综合土地利用动态度, 是用来反映区域内土地利用变化的综合速度^[3, 19, 21-24], 其表达式为:

$$L_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n A_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, L_c 指研究时间段内研究区域的综合土地利用速度; A_i 指研究初始第 i 类土地利用类型的面积大小; ΔA_{i-j} 指研究时间段内第 i 类土地利用类型面积数量转为非 i 类土地利用类型面积数量的绝对值; T 指研究的时间跨度 (a)。

2 土地利用程度

土地利用程度是反映人类对土地进行利用的深度与广度的概念, 它体现的是土地利用中土地的自然属性、人为因素和环境因素的综合效应^[23]。借鉴刘纪远^[25]等建立的土地利用程度数量化综合指标体系, 并赋予不同土地利用类型土地利用程度指数。

2.1 土地利用程度综合指数 土地利用程度综合指数反映的是土地利用/覆被变化的总体变化趋势^[3, 23-26], 其表达式为:

$$L_j = \sum (A_i \times C_i)$$

式中, L_j 指研究区域内的土地利用程度综合指数; A_i 指研究区域内第 i 类土地利用类型的土地利用程度指数; C_i 指某研究时间跨度内研究区域内第 i 类土地利用类型面积占总研

基金项目 深圳湾红树林结构调控及修复技术研究与示范项目 (2013KJCX011-04)。

作者简介 丑庆川 (1988-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向: 景观与湿地资源。* 通讯作者, 教授, 博士, 从事环境保护研究。

收稿日期 2015-03-02

究区域面积的百分比。

2.2 土地利用程度变化 土地利用程度变化是指在特定研究区域内,不同土地利用类型在某一时间跨度内共同变化作用的结果,它可对研究区域内土地利用的动态变化及变化方向从变化量和变化率两个层次进行定量揭示^[3,24]。土地利用程度变化量 D 和变化率 λ 表达式分别为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i2}) - \sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i1})}{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i1})} \times 100\%$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i2}) - \sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i1})}{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{i1})} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\%$$

式中, D 为研究的时间跨度内段研究区域的土地利用程度变化量; λ 指研究的时间跨度内研究区域的土地利用程度变化率; A_i 指研究区域内第 i 类土地利用类型的土地利用程度指数; C_{i1} 和 C_{i2} 分别指研究初始期和研究末期研究区域内第 i 类土地利用类型的面积百分比; t_1 和 t_2 分别指研究始初期和研究末期。

2.3 土地利用类型变化剧烈程度 土地利用类型的变化剧烈程度是指某一时间跨度内研究区域内不同土地利用类型之间相互转化的速度,其可定量揭示研究区域内不同土地利用类型的动态变化及变化方向^[19],其表达式为:

$$S = \left(\sum_{ij} \frac{\Delta S_{i-j}}{S_i} \right) \times 10 \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, S 为与时间 T 对应的究区域土地利用类型变化剧烈程度,为方便将其扩大 10 倍; S_i 为研究初始期第 i 类土地利用类型的面积数量; ΔS_{i-j} 为研究时间跨度内第 i 类土地利用类型面积数量转化为非 i 类土地利用类型面积的绝对值; T 为研究时间跨度的长度,通常为年。

3 土地利用类型变化趋势模型

模型是研究土地利用/覆被变化的重要工具^[27],土地利用类型变化趋势模型可对未来土地利用/覆被状况进行模拟和预测^[28]。目前,预测土地利用类型变化趋势模型有:马尔科夫模型^[19,29-30]、元胞自动机模型^[31-40]、系统动力学模型^[29,41-44]、CLUE 模型^[45-53]、多元统计模型^[54-59]、回归分析模型^[29-51]、类似杜能模型^[60]、智能体模型^[61-69]等多种模型,但其中马尔科夫模型和元胞自动机模型的接受度最高且应用最为广泛,故该研究重点介绍这 2 种模型的基本原理。

3.1 马尔科夫模型

马尔科夫模型是利用某一运动系统的现在状况及其发展动向预测该系统未来状况的分析方法^[29]。在马尔科夫模型中较常用的是一阶马尔科夫过程,即一个运动系统从某一特定的 t 时刻状态运动到 $t+1$ 时刻状态的概率只和 t 时刻状态有关,而与其他时刻的状态无关^[19]。马尔科夫模型的基本方程为:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^{n-1} P_{ik} P_{kj}^{(n-1)} = \sum_{k=0}^{n-1} P_{ik}^{(n-1)} P_{kj}$$

马尔科夫模型成功应用的关键在于对其转移概率的确定,一阶马尔科夫模型主要应用于较小空间尺度的土地利用/覆被变化中^[29]。土地利用/覆被变化中建立马尔科夫模

型的前提是土地利用/覆被转移概率固定不变,而受到社会经济驱动的土地利用/覆被转移概率在长时间尺度内是不可能不变的,因此该模型只适合短期的预测^[30]。

3.2 元胞自动机模型 元胞自动机是一种简单的通过局部转换规则来模拟复杂空间结构的模型^[31],一个标准的模型由元胞、空间、邻居和转换规则组成,空间被分割成规则的网格,每一个网格即为一个元胞,每个元胞具有一个状态,每个元胞各自的状态随时间而变化,每个元胞都是根据局部规则来更新状态^[32]。即每一个元胞在某一特定时刻的状态只决定于上一时刻该元胞的状态和与该元胞相邻的所有元胞上一时刻的状态^[33-34]。常规的标准模型可以简单地表达如下:

$$S^{t+1} = f(S^t, N)$$

式中, S 是状态; N 是邻居; f 是转换函数; t 是时间。

在土地利用/覆被变化的模拟中,元胞一般代表地块信息,每一个元胞的状态由模型的转换规则决定^[35]。转换规则被认为是元胞自动机的核心,目前已有包括多准则判断^[36]、逻辑回归^[37]、神经网络模型^[38]、蚁群算法^[39]、人工免疫系统^[40]等多种方法来确定 CA 模型中转换规则的参数。

4 土地利用类型的景观指数和数量结构多样性模型

4.1 景观偏离度 景观偏离度是指人为建造的人文景观对自然景观的偏离程度。这一指标主要从数量上揭示人类活动对景观改变的程度,数值越大说明人文景观占的比重越大,表明人类对自然的改造越多^[20]。其表达式为:

$$M = \frac{S_a + S_b + S_c + S_d + S_e + S_f}{S_{\text{总}}}$$

式中, M 为景观偏离度; S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d 、 S_e 和 S_f 分别为研究区域内各种建设用地、人工水域、耕地、园地、人工林地和人工草地的面积; $S_{\text{总}}$ 为研究区域的总面积。

4.2 景观多样性 景观多样性是指不同的景观类型在空间结构,功能机制和时间动态方面的多样化和变异性,它反映的事景观的复杂性。引入景观多样性的公式来计算土地利用类型的多样性,其指数越大,说明多样性越多^[20]。表达式为:

$$H(V) = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i$$

式中, $H(V)$ 为多样性指数; p_i 为 i 景观所占的百分比; n 为变量数。

4.3 土地数量结构多样性指数模型 区域土地利用/覆被类型数量结构多样性指数可以用于定量评价区域内各类土地利用/覆被类型的齐全程度和多样化状况^[16],进而分析人类活动对土地的影响程度^[23]。故采用 Gibbs - Mirtin 多样化指数来度量,其模型为:

$$GM = 1 - \frac{S_i^2}{(\sum S_i)^2}, GM \in (0, 1)$$

式中, GM 指多样化指数; S_i 指第 i 种土地利用类型的面积。

5 展望

近 20 年来,随着土地利用/覆被变化研究的不断深入,

国内外学者在土地利用/覆被变化分析方法所代表内涵上的看法基本趋于一致;土地利用程度反映的是人类对土地利用的深度与广度,可定量揭示区域内土地利用的动态变化及变化方向^[23];预测模型是对未来土地利用/覆被状况进行模拟和预测的重要工具等^[28]。

随着 GIS 和遥感技术的不断发展,不断涌现出许多新的进行土地利用/覆被变化研究的方法,社会因素和经济因素对土地利用/覆被变化的不断影响在新方法的探索中越来越受到重视。传统分析方法将不能满足对新技术条件下获得的数据的分析要求,因此,急需更多的理论研究来不断提出新的分析方法以满足大数据条件下的土地利用/覆被变化研究。

参考文献

- [1] ALLEN T R, WANG Y, CRAWFORD T W. Remote Sensing and GIS science in Geomorphology: Remote sensing of land cover dynamics. Academic Press, San Diego, CA, 80 - 102.
- [2] RADOSLAVA K, MIRIAM K, JOZEF N, et al. Land-use and land-cover changes in rural areas during different political systems: A case study of Slovakia from 1782 to 2006[J]. Land Use Policy, 2014, 36: 554 - 566.
- [3] 李德一, 张安定, 王大鹏, 等. 基于遥感的 10 年间龙口市土地利用变化分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 221 - 225.
- [4] 陈怀亮, 徐祥德, 刘玉洁. 土地利用与土地覆盖变化的遥感监测及环境影响研究综述[J]. 气象科技, 2005, 33(4): 289 - 294.
- [5] 刘新卫, 陈百明, 史学正. 国内 LUCC 研究进展综述[J]. 土壤, 2004, 36(2): 132 - 135.
- [6] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81 - 87.
- [7] 陈百明, 刘新卫, 杨红. LUCC 研究的最新进展评述[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 22 - 29.
- [8] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区县域耕地变化驱动要素研究: 以安塞县为例[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 146 - 152.
- [9] 梁伟, 杨勤科. 基于 RS 的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 90 - 92.
- [10] 常庆瑞, 刘京, 杨勤科, 等. 基于 RS 与 GIS 的黄土丘陵沟壑区土地覆盖动态研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2187 - 2190.
- [11] 温仲明, 焦峰, 张晓萍, 等. 黄土丘陵区纸坊沟流域 60 年来土地利用格局变化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 125 - 133.
- [12] 徐勇, 郭腾云. 黄土丘陵区中部土地利用变化历程及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 1 - 4.
- [13] 马建华. 现代自然地理学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2002: 495 - 506.
- [14] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 645 - 652.
- [15] 朱会义, 李秀彬. 环渤海地区土地利用的时空分析[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 253 - 259.
- [16] 朱凤武, 彭补拙. 温州市土地利用空间格局研究[J]. 经济地理, 2001, 21(1): 101 - 104.
- [17] 刘晓曼, 庄大方, 屈冉, 等. 基于遥感数据的 1989 - 2009 年拉鲁湿地变化研究[J]. 湿地科学, 2013(11): 1 - 5.
- [18] 张泽峰, 张韬, 白恒情, 等. 3S 技术在呼和浩特市城市绿地动态变化中的应用研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(1): 31 - 35.
- [19] 于兵. 基于 GIS 的大庆市土地利用动态变化分析与预测[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(2): 45 - 48.
- [20] 崔振洋, 李晓亮. 基于 RS 与 GIS 的山西省土地利用动态变化分析[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 418 - 420.
- [21] 陈本清, 徐涵秋. 厦门市土地利用年际变化遥感分析[J]. 地球信息科学, 2004, 6(3): 99 - 104.
- [22] 赵东波, 梁伟, 杨勤科, 等. 陕北黄土丘陵区近 30 年来土地利用动态变化分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 22 - 26.
- [23] 王安周, 张贵宾, 郑杰, 等. 新乡市土地利用动态变化分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 355 - 357.
- [24] CHOU Q C, LI R L, XU H L, et al. Study on the Land Use/Cover Changes of Mangrove Reserve of Shenzhen Bay based on Remote Sensing Data [J]. Advanced Materials Research, 2014, 962/965: 2533 - 2540.
- [25] 刘修远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 262 - 275.
- [26] 庄大方, 刘修远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105 - 111.
- [27] MOTTET A, LADET S, COQUE N, et al. Agriculture land-use change and its drivers in mountain landscapes: A case study in the Pyrenees [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 114: 296 - 310.
- [28] MATTHEWS R B, GILBERT N G, ROACH A, et al. Agent - based land - use models: a review of application [J]. Landscape Ecology, 2007, 22(10): 1447 - 1459.
- [29] 黄秋昊, 蔡运龙. 国内几种土地利用变化述评[J]. 中国土地科学, 2005, 19(5): 25 - 30.
- [30] 张靖, 同丽嘎, 张庆, 等. 土地利用/覆盖变化研究方法[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2013, 44(3): 329 - 336.
- [31] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [32] TAKEYAMA M, COUCLELI S H. Map dynamics: Integrating cellular automata and GIS through Geo-algebra [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11: 73 - 91.
- [33] 郭红. 元胞自动机模型在森林景观生态规划中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(6): 814 - 817.
- [34] CLARKE K C, HOPPEN S, GAYDOS L. A self-modifying cellular automata model of historical urbanization in the San Francisco Bay area [J]. Environment and Planning B, 1997, 24: 247 - 261.
- [35] 王羊, 高阳, 赵琳, 等. 元胞自动机模型的尺度敏感性分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 750 - 758.
- [36] WU F, WEBSTER C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multi-criteria evaluation [J]. Environment and Planning B, 1998, 25: 103 - 126.
- [37] WU F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(8): 795 - 818.
- [38] LI X, YEH A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(4): 323 - 343.
- [39] 刘小平, 黎夏, 叶嘉安, 等. 利用蚁群智能挖掘地理元胞自动机的转换规则[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(6): 824 - 834.
- [40] 刘小平, 黎夏, 张啸虎, 等. 人工免疫系统与嵌入规划目标的城市模拟及应用[J]. 地理学报, 2008, 63(8): 882 - 894.
- [41] 摆万奇. 深圳市土地利用动态趋势分析[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 112 - 116.
- [42] 徐瑞祥. 区域耕地总量动态平衡模型研究——以温州市为例[J]. 经济地理, 2002, 22(4): 435 - 439.
- [43] 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 599 - 607.
- [44] STEPHENNE N, LAMBIN E F. A dynamic simulation model of land - use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU) [J]. Environment, 2001, 85: 145 - 161.
- [45] VERBURG P H, OVERMARS K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model [J]. Landscape Ecology, 2009, 24(9): 1167 - 1181.
- [46] VELDKAMP A, FRESCO L O. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects [J]. Ecological Modelling, 1996, 85(2/3): 253 - 270.
- [47] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model [J]. Environment Management, 2002, 30(3): 391 - 405.
- [48] 邓祥征, 刘修远, 战金艳, 等. 太仆寺旗土地利用变化时空格局的动态模拟[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 147 - 156.
- [49] 张永民, 赵士洞, VERBURG P H. CLUE - S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用 [J]. 自然资源学报, 2003(3): 310 - 318.
- [50] 蔡玉梅, 刘彦随, 宇振荣, 等. 土地利用变化空间模拟的进展——CLUS - S 模型及其应用[J]. 地理科学进展, 2004(4): 63 - 71.
- [51] 陈佑启. 中国土地利用变化及其影响的空间建模分析[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2): 116 - 127.
- [52] 张永明. 科尔沁沙地及其周围地区土地利用变化的情景分析[J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 29 - 37.
- [53] 张永明. CLUE - S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3): 310 - 318.
- [54] 甘红, 刘彦随, 王大伟. 土地利用类型转换的人文驱动因子模拟分析

- [J]. 资源科学, 2004, 26(2): 88-93.
- [55] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 150-160.
- [56] 王秀兰. 土地利用/土地覆盖变化中的人口因素分析[J]. 资源科学, 2000, 22(3): 39-42.
- [57] 朱会义, 何书金, 张明. 环渤海地区土地利用变化的驱动力分析[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 669-678.
- [58] 摆万奇. 大渡河上游地区土地利用/土地覆被变化与驱动力分析[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 71-78.
- [59] 焦峰, 秦伯强. GIS支持下的小尺度土地驱动力研究——以宜兴市湖溢小流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(3): 205-210.
- [60] 李秀彬. 土地利用变化的解释[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 195-203.
- [61] PARKER D C, MANSON S M, JANSSEN M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(2): 314-337.
- [62] CRAWFORD T W, MESSINA J P, MANSON S M, et al. Complexity science, complex systems, and land-use research[J]. Environment and planning B: Planning and Design, 2005, 32(6): 792-798.
- [63] VALBUENA D, VERBURG P H, BREGT A K. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 128(1/2): 27-36.
- [64] JANSSEN M A, WALKER B H, LANGRIDGE J, et al. An adaptive model for analyzing co-evolution of management and policies in a complex rangeland system[J]. Ecological Modelling, 2000, 131(2/3): 249-268.
- [65] LE Q B. Multi-agent system for simulation of land-use and land-cover change: A Theoretical Framework and its First Implementation for an Upland Watershed in the Central Coast of Vietnam[M]. Gottingen: ZFF, 2005.
- [66] GAUBE V, KAISER C, WILDENBERG M, et al. Combining agent-based and stoke-flow modelling approaches in a participative analysis of the integrated and system in Reichraming, Austria[J]. Landscape Ecology, 2009, 24: 1149-1165.
- [67] MONTICINO M, ACEVEDO M, CALLICOTT B, et al. Multi-agent model of human values and land-use change[C]//Proceedings of the fifth IASTED International Conference on Modelling, Simulation and Optimization, 2005: 279-284.
- [68] ACEVEDO M F, CALLICOTT J B, MONTICINO M, et al. Models of natural and human dynamics in forest landscapes: Cross-site and cross-culture synthesis[J]. Geoforum, 2008, 39: 846-866.
- [69] MESSINA J P, EVANS T P, MANSON S M, et al. Complex systems models and the management of error and uncertainty[J]. Journal of Land Use Science, 2008, 3: 11-25.

(上接第250页)

算技术为今后模型技术发展提供了可能性。

参考文献

- [1] 陶涛, 刘遂庆, 李树平, 等. 城市水资源管理模型的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 60-62.
- [2] SULIS A, SECHI G M. Comparison of generic simulation models for water resource systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 40(3): 214-225.
- [3] LOUCKS D P, STEDINGER J R, HAITH D A. Water Resource Systems Planning and Analysis[M]. Engle wood Cliffs, NJ Prentice-Hall, 1981: 108-115.
- [4] ASSATA H, VAN BEEK E, BORDEN C, et al. Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: A comparison, evaluation, and identification of future needs[M]. US Department of Energy Publications, 2008: 381-387.
- [5] 任希岩, 谢映霞, 朱思诚, 等. 在城市发展转型中重构——关于城市内涝防治问题的战略思考[J]. 城市发展研究, 2012(6): 71-77.
- [6] ANDREU J, CAPILLA J, SANCHIS E. AQUATOOL: A computer-assisted support system for water resources research management including conjunctive use, in Decision Support Systems[M]. Springer, 1991: 333-355.
- [7] ANDREU J, CAPILLA J, SANCHIS E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management[J]. Journal of Hydrology, 1996, 177(3): 269-291.
- [8] GUTIÉRREZ ENRÍQUEZ M M, ARISTIZÁBAL RODRÍGUEZ H F, IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SOPORTE A LA DECISIÓN AQUATOOL EN LA ZONA CENTRO DEL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA[J]. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 2011(6): 40-46.
- [9] LABADIE J, BALDO M, LARSON R. MODSIM; decision support system for river basin management: Documentation and user manual[M]. Dept. of Civil Eng., Colo. State Univ., Ft. Collins, CO, 2000.
- [10] LABADIE J, LARSON R. MODSIM 8.1: River Basin Management Decision Support System. User Manual and Documentation[J]. Colorado State University, Fort Collins, 2007, 123: 85-88.
- [11] MARTIN Q W. Multireservoir Simulation and Optimization Model (SIMV); Program Documentation and User's Manual[M]. Austin, Texas, USA: Texas Department of Water Resources, UM-38, 1982: 35-37.
- [12] BERHE F T, MELESSE A M. Modsim-based water allocation of Awash River Basin, Ethiopia[J]. Proceedings of Watershed Management and Operations Management, 2013, 109: 118-128.
- [13] BROWN L C, BARNWELL T O. The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS; documentation and user manual[R]. US Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Environmental Research Laboratory, 1987.
- [14] HSU N S, CHENG K W. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2002, 128(2): 102-112.
- [15] HYDRAULICS W D. RIBASIM, Version 6.32[M]. WL Delft, Holland: Delft Hydraulics, 2004: 1-125.
- [16] OMAR M M. Evaluation of actions for better water supply and demand management in Fayoum, Egypt using RIBASIM[J]. Water Science, 2013, 27(54): 78-90.
- [17] SECHI G M, SULIS A. Water system management through a mixed optimization-simulation approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(3): 160-170.
- [18] SECHI G M, SULIS A. Water system management through a mixed optimization-simulation approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(3): 160-170.
- [19] SECHI G, SULIS A. Operative indicators for drought mitigation tools in multireservoir systems. Options Méditerranéennes[M]. Série A: Séminaires Méditerranéens (CIHEAM), 2008.
- [20] MATROSOV E S, HAROU J J, LOUCKS D P. A computationally efficient open-source water resource system simulator-Application to London and the Thames Basin[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1599-1610.
- [21] BOUKLIA-HASSANE R, YEBDRI D, TIDJANI A E B. Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province[J]. Desalination and Water Treatment, 2014(a-head-of-print): 1-10.
- [22] CHOI S J, KIM J H, LEE D R. Decision of the water shortage mitigation policy using Multi-Criteria Decision Analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(2): 247-253.
- [23] MABMANN J, WOLFER J, HUBER M, et al. WEAP-MODFLOW as a Decision Support System (DSS) for integrated water resources management: Design of the coupled model and results from a pilot study in Syria[M]//MALOSZEWSKI P, WITCZAK S, MALINA G, et al. Groundwater Quality Sustainability. International Association of Hydrogeologists Selected. CRC Press, 2012: 173.
- [24] YAGHOBI B, SHABANLOU S, YOSEFVAND F. Simulation of rainfall-runoff using WEAP model (case study: Qaraso basin)[J]. Agricultural Communications, 2014, 2(4): 63-68.
- [25] TZABIRAS J. A GIS based district information system for water resources management and planning[R]. in EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.