

大沽河河床非饱和入渗模型研究

杨帆, 武桂芝, 冯增帅, 黄明翔

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: [目的] 研究季节性河流大沽河河道包气带入渗过程及入渗参数, 建立适宜描述季节性河道入渗模型。[方法] 以大沽河上、中、下游 3 处代表性河床野外垂向入渗试验数据为基础, 利用 Matlab 软件对 Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型进行拟合, 求得模型入渗参数, 并评价模型的适宜性。[结果] ① 随上、中、下游沙样孔隙度、粒径、渗透系数依次减小, 干容重依次增大, 其稳定入渗速率依次减小, 约为 0.006 6, 0.004 1, 0.002 5 cm/s; ② Matlab 软件中 Isqcurvefit 函数适用于求模型入渗参数; ③ Horton 模型对上、中、下游河床入渗过程拟合系数最高。[结论] Horton 模型对入渗过程拟合效果最好, 且模型参数具有物理意义, 适宜描述季节性河床入渗过程。

关键词: 季节性河流; 大沽河; 野外试验; 入渗速率; 入渗模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0152-05

中图分类号: S152.7, TV139.16

文献参数: 杨帆, 武桂芝, 冯增帅, 等. 大沽河河床非饱和入渗模型研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 152-156. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.025; Yang Fan, Wu Guizhi, Feng Zengshuai, et al. Un-saturated infiltration model of Dagou River bed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 152-156. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.025

Unsaturated Infiltration Model of Dagou River Bed

YANG Fan, WU Guizhi, FENG Zengshuai, HUANG Mingxiang

(School of Environmental & Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: [Objective] This paper studied the infiltration process and infiltration parameters of the Dagou River aeration zones in the seasonal river, and established a suitable model for describing the seasonal river infiltration. [Methods] Based on the experimental data of vertical infiltration of 3 representative rivers on the upper, middle and lower reaches of Dagou River, Horton model, Kostiakov model and Philip model were fitted by Matlab software, the infiltration parameters were obtained, and the suitability of the infiltration model was evaluated. [Results] ① In the upper, middle and lower reaches, with the successive decreases of sand porosity, particle size, permeability coefficient, dry bulk density increased correspondingly, and the steady infiltration rate decreased, with rates of 0.006 6, 0.004 1, 0.002 5 cm/s. ② The Isqcurvefit function in Matlab software was applied to obtain infiltration parameters of infiltration model. ③ The Horton model had the highest fitting coefficients for the infiltration process of the upper, middle and lower reaches of the river bed. [Conclusion] The Horton model performed the best in the simulation of infiltration process, and the model parameters have virtual physical meaning, and can be used to describe the infiltration process of seasonal river bed.

Keywords: seasonal channel; Dagou River; field experiment; infiltration rate; infiltration model

干旱或半干旱区域河流多为季节性河流, 季节性河流丰水期水量大, 枯水期河道干枯或少水。季节性河床入渗直接影响着洪水演进与地下水补给的过程。

季节性河床入渗规律的研究, 不仅对河道洪水的准确预报, 并且对地下水的补给量计算都具有重要意义^[1-3]。近些年, 国内外学者在河道入渗规律与模型

收稿日期: 2017-06-19

修回日期: 2017-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“季节性河道渗漏影响洪水演进机理及效应研究”(51309137)

第一作者: 杨帆(1991—), 男(汉族), 安徽省池州市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源管理、保护与水环境模拟。E-mail: 763437163@qq.com。

通讯作者: 武桂芝(1974—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源管理、保护与水环境模拟等方面的研究。E-mail: guizhiwu701@163.com。

方面做了相关研究工作。张应华等^[4]利用入渗仪对黑河下游河床入渗能力进行了定点测量,计算了黑河下游河床的年入渗量。张彦增等^[5]根据引黄济冀(津)清凉江河道的输水资料,选取不同研究河段,对河道渗漏损失率及与上游引水量的关系、河道入渗补给系数等作了定量分析,根究了河北省中东部平原河道渗漏损失一般规律。张石春等^[6]利用水资源实验资料,通过分析非饱和带土壤水的运移规律,分析了不同水文地质条件下的河道渗漏补给系数。汪生斌等^[7]以格尔木河为研究对象,应用 Bauwer 渗水仪以及竖管法,分析了河水的入渗规律,计算了河床沉积物渗透系数,寻找河床渗透能力沿河的变化情况,观测了不同水头下的河流渗透流速。陆中央^[8]利用水文学方法分析平原河道输水过程中的入渗规律,利用水文观测资料求出单位河长输水损失量的经验公式,再用初损—后渗法求出损失量补给系数,按河床质和河道流经地区的土壤岩性分类,给出分类的损失量公式和补给系数。Zhao 等^[9]利用洪水观测资料,应用计算机数值模拟技术对数值模型中的洪水入渗进行了校核,比较准确地计算了河道洪水入渗强度。利用已有资料、渗水仪及竖管法、水力学方法对季节性河道入渗规律的研究有一定的局限性与误差性。季节性河道入渗计算公式较少但亦有采用,王宗志等^[10]推导了考虑河道下渗的圣维南方程组,并遴选霍顿下渗公式为河道下渗模拟方法,构建了考虑河道下渗的河网洪水模拟模型。程亮等^[11]采用土壤下渗理论描述河道下渗,推导出了河道下渗流量计算公式,建立了基于霍顿下渗公式的河道下渗模拟方法。王艳丽等^[12]在滹沱河预报中提出了霍顿饱和下渗与马斯京根分段连续演算方法相结合的河道洪水演算方法来解决预报精度问题。王春泽等^[13]提出了霍顿饱和下渗和马斯京根分段连续演算相结合的“时变参数”方法。孟德娟等^[14]建立了基于 Horton 下渗公式及径流系数法和雨水管道能力扣损的地表产流模块。朱

冰冰等^[15]使用双环法对长江中上游水土流失严重区的 37 个县(市)进行原位测试,显示在长江中上游地区利用蒋定生公式、Horton 公式对土壤入渗过程拟合的精度高于 Philip 方程、Kostiakov 公式。Li 等^[16]通过分析巴宝河的土壤水分渗透过程,评估了 Philip、Kostiakov 和 Horton 的渗透模型的性能,显示 Kostiakov 模型最适合研究高山草坪土壤的渗透过程。上述几种河道下渗模拟方法或模型均是由土壤水分入渗理论直接描述的,土壤水分入渗模型常见的就有好多种,没有具体说明各土壤入渗模型公式在河道入渗方面应用的适宜性与准确度。本研究以野外垂向入渗试验结果为基础,利用 Matlab 中非线性回归函数,求得入渗模型入渗参数和拟合得到适宜的河道入渗模型,为后期构建季节性河道渗漏影响的洪水演进数学模型以及进行河道渗漏数值模拟计算提供科学依据。

1 研究区域概况

大沽河发源于烟台市阜山,流经青岛市辖莱西、平度、即墨、胶州、城阳等,干流全长 179.9 km,流域总面积 6131.3 km²。其流量、水位等水文特征随季节更替有明显变化,夏秋季雨量丰沛,径流量较大;冬春季降水较少,径流量小或断流,属于季节性河流。大沽河属宽浅型砂质河床,河床渗透能力较强,大部分河床经常处于干涸无水状态。

综合考虑季节性河流大沽河河道特点、沙样质地等因素,选择 2016 年 5 月枯水期大沽河上游河段莱西市孙受镇马家会村,中游河段即墨市移风店镇马军寨村和下游河段胶州市李哥庄镇贾疃村作为试验场地。各试验点选定约 1.5 m²(1 400 mm×1 050 mm)典型地块进行改进的双环装置入渗试验。试验前期,分别在现场采集沙样,在室内测定试验场沙样的水理性质(孔隙度、中值粒径、干容重、初始含水率、渗透系数等)详见表 1。

表 1 试验场地包气带水理特性

试验场地	经纬度	孔隙度/ %	中值粒径/ mm	最大干容重/ (kg·m ⁻³)	初始含 水率/%	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
马家会村	36°47′06″N,120°25′07″E	43.62	0.94	1 420	3.44	28.59
马军寨村	36°30′34″N,120°17′34″E	42.00	0.81	1 570	2.25	26.54
贾疃村	36°26′01″N,120°07′37″E	40.98	0.57	1 650	3.47	23.13

2 数据来源

选择季节性河流大沽河上、中、下游 3 处代表性河床作为试验点。

通过自制改进的双环垂向入渗装置、水分传感器等观测了不同包气带水理性质下河床入渗过程,获得各试验点不同深度的动态入渗过程,即入渗速率^[17]。

3 入渗模型拟合与结果分析

国内外学者在研究水分入渗过程提出了许多半理论半经验性的或纯经验性的入渗模型,半理论半经验性的有 Philip 模型和 Green-Ampt 模型等;经验性的主要有 Kostiakov 模型、修正 Kostiakov 模型和 Horton 模型等。不同入渗模型都在一定程度上反映了入渗规律,且都具有其使用性,本研究选取 Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型作为研究对象。利用 Matlab 软件的非线性拟合和非线性回归函数(Isqcurvefit 函数)对野外试验数据进行分析,求得各模型入渗参数并对试验数据拟合,探讨其模拟河床入渗过程的适宜性与准确性,结果详见图 1—9 与表 2—4。

3.1 Isqcurvefit 函数求参

利用 Matlab 软件 Isqcurvefit 函数求参,首先建立 M-file 文件,定义函数(3 种模型)来计算向量函数 $I(x, xdata)$,保存为 fun.m 文件名,然后在命令窗口输入 xdata(时间数据)、ydata(入渗率数据)、参数初

始值 x_0 ,执行 Isqcurvefit 函数命令,求得模型参数。

3.2 Horton 模型

Horton 模型的具体表达为:

$$I_{(t)} = I_c + (I_0 - I_c) \cdot \exp(-\beta \cdot t) \tag{1}$$

式中: $I_{(t)}$ ——入渗率(cm/s); t ——入渗时间(min); I_c ——稳定入渗率; I_0 ——初始入渗率(cm/s); β ——入渗参数。

由图 1—3 可知,Horton 模型模拟曲线与上、中、下游试验实测值吻合度较好。由表 2 可知,使用 Horton 模型对河床入渗过程拟合结果显示,参数 β 范围在 0.253 1~0.283 4,参数 β 在一定程度上决定了入渗率由 I_0 减小到 I_c 的速度。当 $t \rightarrow 0$ 时,求得上、中、下游初始入渗率分别为 0.064 2,0.039 7 和 0.025 1 cm/s,与试验实测值结果基本一致;当 $t \rightarrow \infty$ 时,求得上、中、下游稳定入渗率分别为 0.006 5,0.004 2,0.002 6 cm/s,与试验实测值结果基本一致。拟合系数范围在 0.91~0.96,均大于 0.90,说明 Horton 模型对上、中、下游河床入渗过程拟合效果较好,适用于描述季节性河床水分入渗过程。

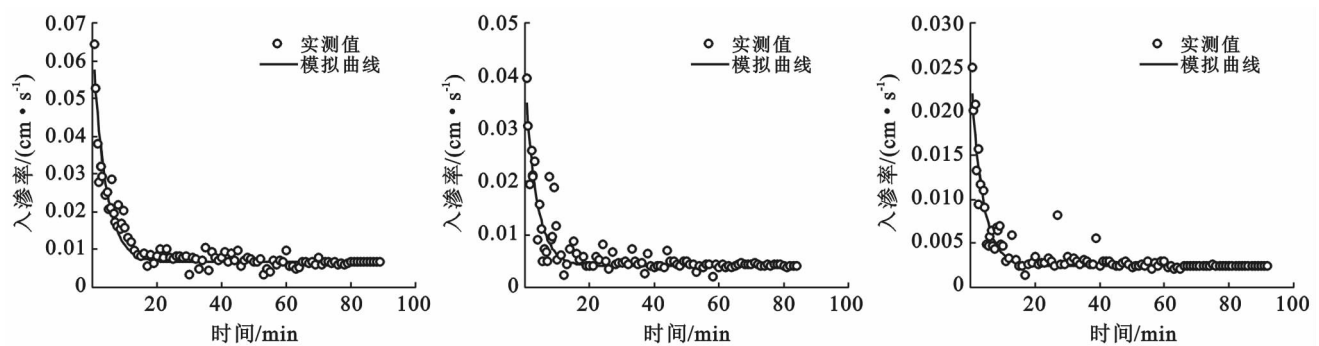


图 1 上游试验入渗速率实测值与 Horton 模拟曲线

图 2 中游试验入渗速率实测值与 Horton 模拟曲线

图 3 下游试验入渗速率实测值与 Horton 模拟曲线

表 2 Horton 模拟方程

试验点	模拟方程: $I_{(t)} = I_c + (I_0 - I_c) \cdot \exp(-\beta \cdot t)$	拟合系数
上游	$I_{(t)} = 0.006\ 5 + 0.057\ 7 \exp(-0.253\ 1t)$	0.96
中游	$I_{(t)} = 0.004\ 2 + 0.035\ 5 \exp(-0.283\ 4t)$	0.91
下游	$I_{(t)} = 0.002\ 6 + 0.022\ 5 \exp(-0.281\ 7t)$	0.96

3.3 Kostiakov 模型

Kostiakov 模型具体表达为:

$$I_{(t)} = B \cdot t^{-a} \tag{2}$$

式中: $I_{(t)}$ ——入渗率(cm/s); t ——入渗时间(min); B, a ——入渗参数。

由图 4—6 可知,Kostiakov 模型模拟曲线与上、中、下游试验实测值吻合度较好。由表 3 可知,使用 Kostiakov 模型对河床入渗过程拟合结果显示,参数 B 范围在 0.018 8~0.047 6,参数 a 范围在 0.499 7~

0.527 0,参数 B 值越大,入渗曲线的斜率越大,瞬时入渗率衰减越快,参数 a 无实际物理意义。当 $t \rightarrow 0$ 时,求得上、中、下游初始入渗率趋向于 ∞ ;当 $t \rightarrow \infty$ 时,求得上、中、下游稳定入渗率都为 0 cm/s,只在水平吸渗条件下才有可能,垂直入渗条件显然是不符合的。拟合系数范围在 0.86~0.93,均大于 0.85,说明 Kostiakov 模型对上、中、下游河床入渗过程拟合效果较好。只要能确定出 t 的范围,使用该模型描述季节性河床水分入渗过程还是比较简便且较为准确。

表 3 Kostiakov 模拟方程

试验点	模拟方程: $I_{(t)} = B \cdot t^{-a}$	拟合系数
上游	$I_{(t)} = 0.047\ 6t^{-0.499\ 7}$	0.93
中游	$I_{(t)} = 0.028\ 9t^{-0.504\ 0}$	0.86
下游	$I_{(t)} = 0.018\ 8t^{-0.527\ 0}$	0.91

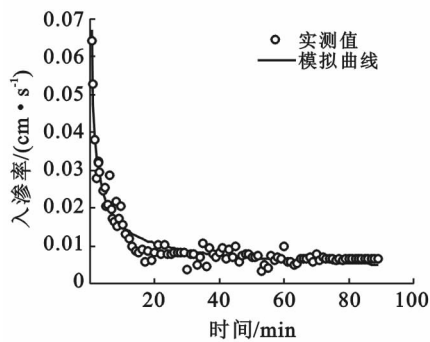


图 4 上游试验入渗速率实测值与 Kostiakov 模拟曲线

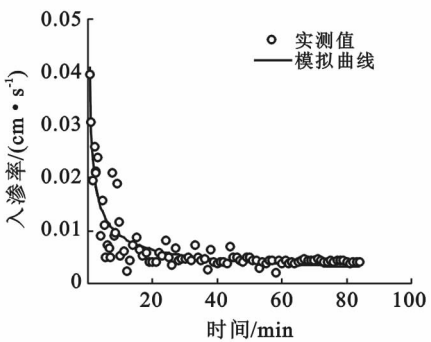


图 5 中游试验入渗速率实测值与 Kostiakov 模拟曲线

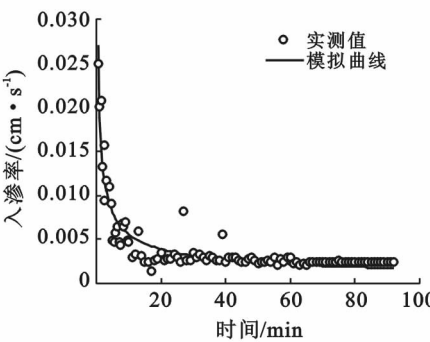


图 6 下游试验入渗速率实测值与 Kostiakov 模拟曲线

3.4 Philip 模型

Philip 模型具体表达为:

$$I_{(t)}=I_c+0.5S\cdot t^{-0.5}\tag{3}$$

式中: $I_{(t)}$ ——入渗率(cm/s); t ——入渗时间(min);
 I_c ——稳定入渗率(cm/s); S ——入渗参数。

由图 7—9 可知,Philip 模型模拟曲线与上、中、下游试验实测值吻合度较差。

由表 4 可以看出,使用 Philip 模型对河床入渗过程拟合结果显示,参数 S 范围在 0.024 1~0.062 7,在入渗初始阶段,参数 S 起着主要作用,相当于水平吸渗的情况,但随着入渗时间的增长, I_c 则成为影响入渗的主要因素。拟合系数范围在 0.78~0.83,均小于 0.85,说明 Philip 模型对上、中、下游河床入渗过程拟合效果较差。

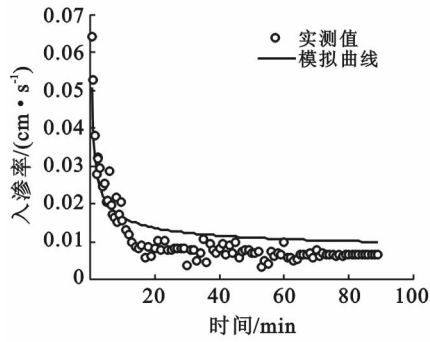


图 7 上游试验入渗速率实测值与 Philip 模拟曲线

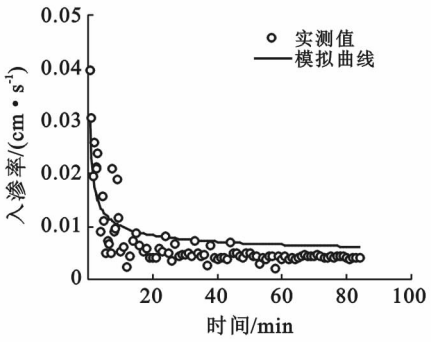


图 8 中游试验入渗速率实测值与 Philip 模拟曲线

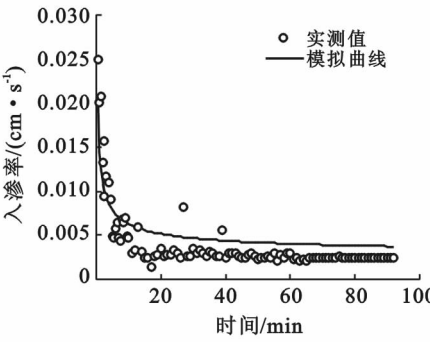


图 9 下游试验入渗速率实测值与 Philip 模拟曲线

表 4 Philip 模拟方程

试验点	模拟方程: $I_{(t)}=I_c+0.5S\cdot t^{-0.5}$	拟合系数
上游	$I_{(t)}=0.006\ 6+0.5\times0.062\ 7t^{-0.5}$	0.83
中游	$I_{(t)}=0.004\ 1+0.5\times0.037\ 5t^{-0.5}$	0.78
下游	$I_{(t)}=0.002\ 5+0.5\times0.024\ 1t^{-0.5}$	0.82

4 结论

(1) 河床入渗过程入渗速率曲线结果显示,随着大沽河上、中、下游沙样的孔隙度、粒径、渗透系数依次减小,干容重依次增大,大沽河干流河床稳定入渗率依次减小,分别约为 0.006 6,0.004 1,0.002 5 cm/s。

(2) 入渗速率实测值与拟合结果显示,Matlab 软件中 Isqcurvefit 函数适用于求得模型中入渗参数。

(3) 入渗过程曲线的拟合结果显示,Horton 模型和 Kostiakov 模型对大沽河上、中、下游河床入渗过程拟合效果较好,Philip 模型的拟合效果较差。其中,Horton 模型拟合系数最高,且模型参数具有物理意义,适宜描述季节性河床入渗过程。

[参 考 文 献]

[1] Dahan O, Tatarsky B, Enzel Y, et al. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert[J]. Ground Water, 2008,46(3): 50-461.

[2] Shentsis I, Rosenthal E. Recharge of aquifers by flood events in an arid region[J]. Hydrological Processes, 2003,17(4):695-712.

[3] 王少丽,Thielen R,李祥福,等.渠道渗漏量的试验及分析方法[J].灌溉排水,1998,17(2):39-42.

- [4] 张应华, 仵彦卿, 乔茂云. 黑河下游河床渗漏试验研究[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 257-260.
- [5] 张彦增, 尹俊岭. 河北省中东部平原区河道渗漏损失率分析探讨[J]. 地下水, 2002, 24(1): 10-11.
- [6] 张石春, 季志恒, 贾茂平, 等. 大埋深条件下水文地质参数分析[J]. 水利规划与设计, 2003(3): 19-23.
- [7] 汪生斌, 王万平, 贺海松, 等. 格尔木河河床入渗能力分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(28): 99-100.
- [8] 陆中央. 应用水文学方法推求河道渗漏补给量[J]. 水文地质工程地质, 1985(6): 41-43.
- [9] Zhao Baofeng, Ding Xiang, Cao Haidong. The recognition of river channel flood infiltration capacity based on numerical simulation[C]// International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. IEEE, 2011: 910-913.
- [10] 王宗志, 程亮, 王银堂, 等. 高强度人类活动作用下考虑河道下渗的河网洪水模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 414-424.
- [11] 程亮, 王宗志, 胡四一, 等. 强烈下渗条件下天然河道洪水演进模拟方法[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2015, 45(2): 207-215.
- [12] 王艳丽. 时变参数法在滹沱河洪水预报中的应用[J]. 地下水, 2016, 38(3): 139-141.
- [13] 王春泽, 胡军波, 刘彦华, 等. 时变参数法在洪水预报中应用[J]. 水文, 2010, 30(5): 32-37.
- [14] 孟德娟, 李森, 魏保义, 等. 基于 MIKE21 模型的流域地表积水风险模拟[J]. 北京水务, 2015(2): 26-30.
- [15] 朱冰冰, 张平仓, 丁文峰, 等. 长江中上游地区土壤入渗规律研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 43-47.
- [16] Li Guangwen, Feng Qi, Zhang Fuping, et al. Research on the infiltration processes of lawn soils of the Babao River in the Qilian Mountain. [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014, 70(4): 577.
- [17] 冯增帅. 季节性河道非饱和带现场入渗试验及室内试验数值模拟研究[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2016.

(上接第 151 页)

- [17] Peng Jian, Cai Yunlong, P. H. Verburg. Simulation of land use/cover change scenarios in karst mountain areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 64-70.
- [18] Zheng Xinqi, Zhao Lu, Hu Yecui, et al. Spatio-temporal allocation of general land-use planning index. [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 6(4): 297-305(9).
- [19] 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 73-77.
- [20] 张永民, 赵士洞, P. H. Verburg. 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.
- [21] 曾永年, 何丽丽, 靳文甦, 等. 长株潭城市群核心区城镇景观空间扩张过程定量分析[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 544-549.
- [22] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [23] 曾永年, 靳文甦, 王慧敏, 等. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185-194.
- [24] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.