

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.07

塔里木河生态水流情势分析及其适应性利用

杨帆¹, 薛联青^{1,2,3}, 张洛晨⁴, 杨昌兵², 魏光辉⁴, 陈新芳¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 德克萨斯大学奥斯汀分校水文地质系, 美国 奥斯汀 TX78705;
3. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243000; 4. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 综合分析了外界干扰下的塔里木河流域生态水流情势, 采用组合回归模型建立了适应生态变化的水流利用关系, 修正了水文-生态响应关系和生态水流估算结果, 进一步讨论了适应生态过程的水流情势利用策略。结果表明: 自20世纪60年代以来, 塔里木河源流与干流水流情势变化不一致, 源流来水保证率递减, 源流区间耗水量呈增加趋势。相比ARMA(auto-regressive and moving average)模型, 基于不同利用方式的生态水流组合回归模型模拟效果较好, 可作为参考性预报; 结合生态水流预测方程, 制定了适应生态的水量调度对策。

关键词: 生态水流情势; 适应性利用; 组合回归模型; 水资源调度; 塔里木河

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2018)05-0041-09

Analysis of ecological water regime in Tarim River and its adaptive utilization

YANG Fan¹, XUE Lianqing^{1,2,3}, ZHANG Luochen⁴, YANG Changbin²,
WEI Guanghui⁴, CHEN Xinfang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Geological Sciences, University of Texas at Austin, Austin TX78705, USA;
3. Wentian College, Hohai University, Maanshan 243000, China;
4. Tarim River Basin Administration of Xinjiang, Korla 841000, China)

Abstract: Based on the comprehensive analysis of the ecological water regime in the Tarim River Basin under external disturbance, a combined regression model was used to establish the flow utilization relationship adapted to the ecological changes. The hydrological-ecological response relationship and the results of ecological flow estimation were revised and the utilization strategy of water regime to adapt to the ecological process was discussed. The results show that since the 1960s, the flow regime of the Tarim River source and main stream has changed inconsistently, the guaranteed rate of the source incoming water is decreasing, and the water consumption in the source region is increasing. Compared with ARMA (auto-regressive and moving average) model, the combined regression model of ecological flow based on different utilization modes has better simulation effect and can be used as a reference forecast. Combined with the prediction equation of ecological flow, the water dispatching strategy suitable for ecology is worked out.

Key words: ecological water regime; adaptive utilization; combined regression model; water resources regulation; Tarim River

基金项目: 国家自然科学基金(41371052); 水利部公益性行业专项(201501059); 国家重点研发计划(2017YFC0404304); 江苏省水利科技项目(2017027); 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目(苏教师[2015]35号)

作者简介: 杨帆(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: yangfhydrology@foxmail.com

通信作者: 薛联青, 教授。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

引水灌溉、筑坝蓄水等水资源开发利用行为所引起的自然水流情势改变,是导致许多河流生态问题的主要原因之一^[1-3]。生态水流适应性利用是指在保证河流生态系统良性循环的前提下,在水资源开发利用过程中考虑人类活动、气候变化、陆面变化等环境变化对水文过程的影响,调整水文过程以适应生态变化的水流利用模式^[4]。生态水流适应性利用概念的提出正是为了缓解河流水资源开发利用与生态环境保护的矛盾。国内外学者对生态水流的理论研究从最早阶段的最小保证生态需水量^[5],到在不同季节或不同月份维持阶梯式变化的标准流量^[6],再到形成一种具有季节性涨落变化的动态水文过程^[7]。随着河流水文、水质、泥沙和生物研究的深入,基于生态-水文响应关系的生态水流评估得到广泛关注^[8-9]。Wang等^[10]采用整体法针对单项生态目标分别建立了水文指标与生态指标之间的量化关系,结合生态保护目标和人类需水综合估算了环境水流。薛联青等^[11]采用改进的变化范围法定量评估了水库兴建对下游河流生态水文情势的影响。这些生态水流评估研究一般假设自然水流情势是生态水流的最佳状态^[12],然而,近几十年来,气候和下面条件的变化已经导致生态水流情势发生显著改变,鉴于此,生态水流情势的适应性利用应基于相似的动态水流变化基础,并且有必要重新确定水资源开发利用的理想水流状态^[13]。本文以干旱区塔里木河流域为研究对象,从不同水平年的角度分析源流及干流的生态水流情势,基于逐步回归和自回归滑动平均的组合回归模型,构建适应于生态变化的不同利用方式的水流变化方程,以期为流域构建适宜的生态水文条件及水资源适应性利用提供科学参考。

1 研究区概况

塔里木河流域位于东经 73°10' ~ 94°05', 北纬

34°55' ~ 43°08', 总面积 102 万 km², 是我国第一大内陆河流域^[14]。受高山环绕影响,塔里木河流域形成了典型的大陆性干旱气候,具有降水稀少、蒸发强烈、昼夜温差大的气候特征。流域多年平均地表径流量为 398.3 × 10⁸ m³,干流区径流补给主要来源于阿克苏河(73.2%)、和田河(23.2%)及叶尔羌河(3.6%)。塔里木河流域以水养农业经济为主,经济发展高度依赖水资源分布。随着流域内工农业生产的发展和人口的不断增加,流域生态水文过程变化显著,尤其是 20 世纪 70 年代以来,塔里木河干流下游长期断流,生态环境严重恶化。2015 年塔里木河流域植被覆盖及水系情况见图 1。

2 研究方法

2.1 生态水流情势分析方法

在生态水流情势分析中,一般采用滑动 T 检验法^[15],在此不做详细介绍。根据 GB/T50095—98《水文基本术语和符号标准》,利用 P-III 频率分析法确定源流及干流水文过程的统计参数和各频率设计值,采用对应 10%、25%、50%、75%、90% 的保证率作为划分径流量丰、平、枯水年的标准^[16]。

2.2 组合回归模型

选择 ARMA(auto-regressive and moving average)模型和组合回归模型进行对比分析,从而确定组合模型与单个模型在塔里木河流域的适用性。根据生态水文过程的水量平衡关系,源流来水量一般由河道渗透量、生态变化天然补给量、生态变化周期性水量和生态变化随机性水量组成,而地表径流量为源流来水量与河道渗透量的差值,表达式为

$$L(t) = S(t) + T(t) + P(t) + R(t) \quad (1)$$

$$X(t) = L(t) - S(t) \quad (2)$$

式中: $L(t)$ 为源流来水量; $S(t)$ 为河道沿程渗透量; $T(t)$ 为生态变化天然补给量,表示水文过程

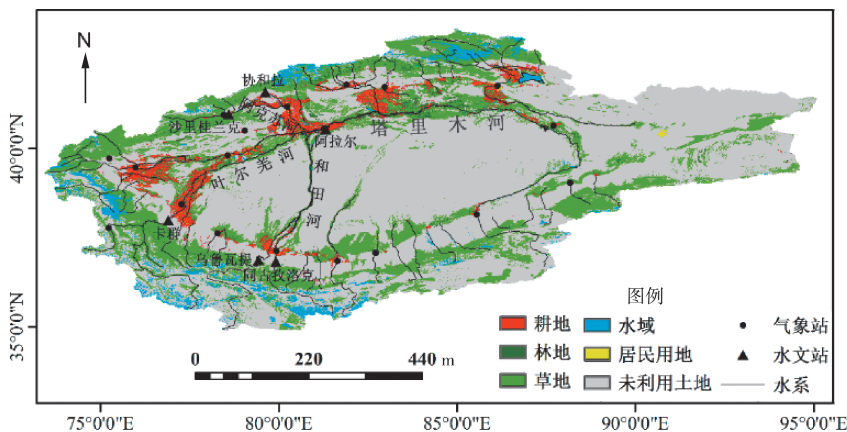


图 1 2015 年塔里木河流域植被覆盖及水系

因水文或气象因素引起的季节性或多年变化趋势; $P(t)$ 为生态变化周期性水量, 表示水文过程按年、月等呈现的周期性变化; $R(t)$ 为生态变化随机性水量, 表示临时性、偶然性的因素引起水文过程的随机变化水量; $X(t)$ 为地表径流量; t 为时间变量。

运用非平稳序列逐步回归趋势分析和周期分析将 $T(t)$ 和 $P(t)$ 分离出来, 获得 $\hat{T}(t)$ 、 $\hat{P}(t)$ 序列, $\hat{T}(t)$ 、 $\hat{P}(t)$ 序列为稳定性成分; $T(t)$ 和 $P(t)$ 分离后的 $R(t)$ 是非平稳时间序列, 利用 ARMA 模型进行拟合, 可得到 $R(t)$ 的表达式^[17]。

2.2.1 $T(t)$ 的分离方法

借助 SPSS19.0 软件, 采用非平稳序列逐步回归分析法选择水文过程的预报因子, 对预报因子进行统计检验, 若所有回归系数为 0 的假设不成立, 则能够认定该水文过程存在 $T(t)$; 反之, 该水文过程不存在 $T(t)$ 。 $T(t)$ 是预报对象和预报因子之间的函数。对于剔除渗透量后的地表径流过程, $T(t)$ 的近似值可表示为

$$T(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^{-1} + b_6t^{-2} + b_7t^{-1/2} + b_8t^{1/2} + b_9e^t + b_{10}\ln t \quad (3)$$

式中 b_0, b_1, \dots, b_{10} 为系数。

逐步回归模型将时间变量 t 组成的 $t, t^2, t^3, t^4, t^{-1}, t^{-2}, t^{-1/2}, t^{1/2}, e^t, \ln t$ 等作为预报因子, 年径流量序列作为预报对象, 回归计算中对预报因子进行筛选, 在信度 $\alpha = 0.05$ 时选择预报因子, 直到引入所有合格的预报因子, 回归结束, 计算各被选变量的回归方程及模拟精度。若方程对应的显著性水平小于 0.05, 可以拒绝原假设, 表明回归方程预报因子整体上对预报对象有显著性的线性影响, 回归方程显著。

2.2.2 $P(t)$ 的分离方法

将 $X(t)$ 剔除 $T(t)$ 后的序列作为 $P(t)$ 的预报序列 $y(t)$ 。 $y(t)$ 依次按长度 $l (2 \leq l \leq m)$ 进行分组:

$$\begin{cases} y(1), \dots, y(i), \dots, y(l) \\ y(1+l), \dots, y(i+l), \dots, y(2l) \\ \vdots \\ y(1+(n_0-1)l), \dots, y(i+(n_0-1)l), \dots, y(n) \end{cases} \quad (4)$$

式中: n 为原序列样本长度, n_0 为满足 $i + (n_0 - 1)l \leq n$ 的最大整数, $m = \text{int}(n/2)$ 。对各组求平均, 则得到一个长度为 l 的平均值序列, 称之为长度为 l 的试验周期序列。按不同长度分组为 $(m - 1)$ 个试验周

期序列。将各试验周期序列按其周期性外延, 时期长度为 n , 并将这 $m - 1$ 个新序列视为因子 x_1, x_2, \dots, x_m 。则回归方程 $P(t)$ 可以表示为

$$P(t) = \sum_{i=1}^m (a_i x_{i,t}) \quad (5)$$

式中: i 为周期数, $i = 2, 3, \dots, m$; t 为时间 ($t = 1, 2, \dots, n$)。利用逐步回归方法, 对 x_1, x_2, \dots, x_{m-1} 进行变量的引入和剔除, 直到既无变量可剔除又无变量可引入为止, 记下被选变量的序号 i 。计算各被选变量的回归方程及模拟精度。若方程对应的显著性水平小于 0.05, 可以拒绝原假设, 表明回归方程预报因子整体上对预报对象有显著性的影响, 回归方程显著。

2.2.3 利用 ARMA 模型的 $R(t)$ 分离方法

将 $X(t)$ 中的 $\hat{T}(t)$ 和 $\hat{P}(t)$ 分离后, 借助 Eviews7.2 软件, 对得到的序列应用 ARMA 模型进行估计, (p, q) 表示 ARMA 模型阶数。利用 AIC (Akaike information criterion) 准则进行识别, 确定模型的 AIC 值最小的模型阶数 (p, q) 。 $R(t)$ 的表达式为

$$R(t) = \varphi_0 + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (6)$$

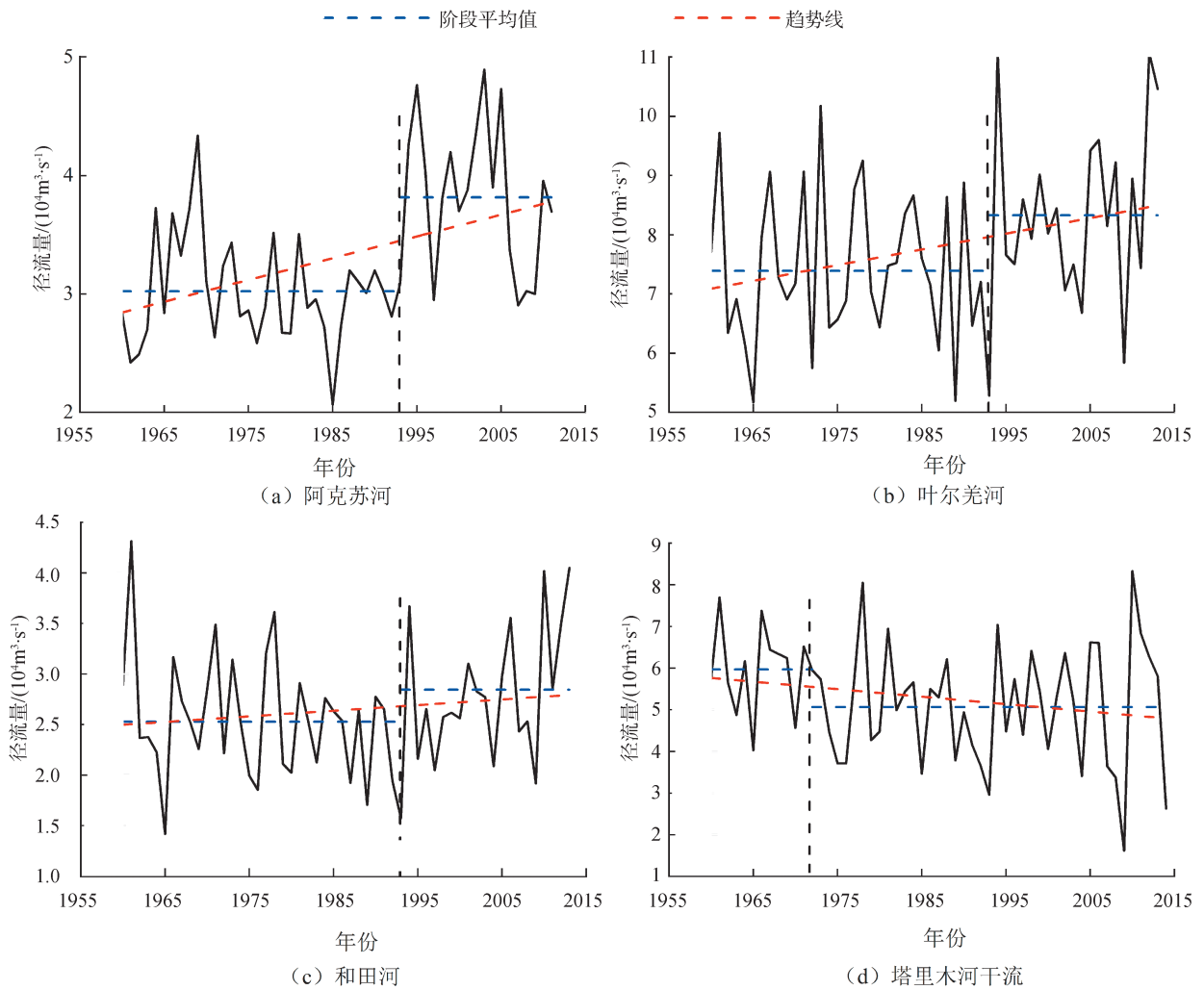
式中: φ_p 为自回归模型的系数; θ_q 为滑动平均模型的系数。

2.2.4 模拟精度评价标准

根据水文情报预报规范 (GB/T 22482—2008) 中长期预报精度评价方法, 当一次预报的误差小于许可误差 (20%) 时, 视为合格^[18]。合格预报次数与总次数的百分比为合格率, 表示预报总体精度水平。预报项目的精度按照预报合格率的大小分为 3 个等级。合格率超过 85% 为甲等; 合格率在 70% ~ 85% 为乙等; 合格率在 60% ~ 70% 为丙等。预报精度达到甲、乙两个等级者, 可用于发布正式预报; 精度达到丙级者, 可用于参考性预报; 精度丙级以下者, 只能用于参考性估报。

3 塔里木河生态水流情势分析

水流情势是河流生态过程的重要驱动力, 水流季节性涨落、年际变化过程与河流水质、泥沙及水生生物的更替过程之间存在着天然匹配的契合关系^[10]。图 2 为 1960—2011 年塔里木河源流及干流径流变化过程。由图 2 可知, 源流和干流的径流年际变化趋势不一致, 总体上源流来水量呈增加趋势, 干流来水量呈减少趋势。采用滑动 t 检验对源流及干流年径流变化趋势进行检验发现, 源流地表径流



注:滑动 T 检验中, $P < 0.01$ 表示特别显著变化; $\uparrow * (\downarrow *) P < 0.05$ 表示显著上升(下降); $P \geq 0.05$ 表示变化不显著。

图 2 塔里木河源流及干流径流变化过程

在 1993 年前后变化明显,阿克苏河、叶尔羌河和田河的趋势系数分别为 $0.018 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($p < 0.01$)、 $0.027 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($p < 0.05$) 和 $0.006 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($p = 0.12$), 呈现增加趋势。干流地表径流在 1972 年前后变化显著,趋势系数为 $0.018 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ($p < 0.05$), 呈现减少趋势。1960—2011 年区间耗水量呈增加趋势,最主要原因可能与源流区农业灌溉面积扩大和无序开挖引排等有关。随着塔里木河流域气候在 20 世纪 80 年代开始明显地“增暖变湿”^[19],源流区地表径流呈现不同程度的增加,但由于人类活动规模和强度的持续增加,干流生态环境逐渐退化。2000 年以后,流域生态环境在各项治理措施的实施下有所改善,但仍然处于极其脆弱的局面。

流域生态状况与自然水文过程是可自由流动河段生态水流情势评估的参考。根据 1960—2011 年塔里木河源流及干流的水文频率曲线,查得 10%、25%、50%、75% 和 90% 对应的径流量,并计算出不

同频率对应的源流区间耗水量(表 1)。由表 1 可知,随着保证率的增加,源流区间耗水量呈减小趋势。当源流来水频率小于 50% (偏丰)时,干流径流的增加幅度小于源流,源流区间耗水量的增加幅度较为明显,这是由于丰水期源流地表水资源被大量灌溉引水利用,以及河道漫溢、水面蒸发等加剧导致水流损耗严重;当频率大于 50% (偏枯)时,干流径流的减小幅度小于源流,区间耗水量减小幅度较为平缓,这是由于在枯水期,管理措施的实施保障了流域水资源的空间均衡,与已有研究结果一致^[20]。

表 1 不同频率下源流区间耗水量的预测

频率/%	相应频率源流 总径流量/亿 m^3	相应频率干 流径流量/亿 m^3	预测源流区 间耗水量/亿 m^3
10	243.08	69.98	173.10
25	214.39	53.64	160.75
50	198.58	44.76	153.82
75	172.83	36.42	136.41
90	160.82	31.09	129.73

图3为塔里木河1960—2011年源流及干流的年径流丰枯变化过程,可见源流区水文过程呈现显著的“由枯转丰”的趋势,干流区水文过程呈现“由丰转枯”的趋势。结合表1的耗水量数据,预测未来一段时间,源流区间耗水量仍保持的明显的增加趋势。可依据生态水流情势特征,开发适宜的生态功能区,如高流量过程适合于乔木类植物生长和生物的繁殖与迁徙,低流量过程有利于灌木、草地的生长和生物越冬。

4 生态水流适应性利用分析

当前生态调度遵循总量控制原则,在水资源长期匮乏的干旱区适用性较差,而生态水流适应性利用无疑是一种更有效的生态调度方式。生态水流适应性利用是根据不同水平年的生态水流的周期、趋势和洪峰低谷等变化特征,在时间上和空间

上实行定期和不定期水量分配,从而更有效的利用有限的水资源。因此,生态水流适应性利用是适应环境变化和保障水资源系统良性循环的水资源利用方式。

针对塔里木河流域源流及干流年径流序列,将研究时段分为率定期(1960—2000年)和检验期(2001—2011年),分别采用ARMA模型和组合回归模型进行适应性的对比分析。ARMA模型直接对生态水流序列进行预测,而组合回归模型将流域生态水流按照不同利用方式分为生态变化天然补给量 $T(t)$ 、生态变化周期性水量 $P(t)$ 和生态变化随机性水量 $R(t)$ 进行预测。

4.1 $T(t)$ 的预测

利用前文中介绍的方法建立 $T(t)$ 方程,方程对应的回归系数、相关系数、统计量和显著性水平见表2。图4为径流量实测值与 $T(t)$ 的变化过

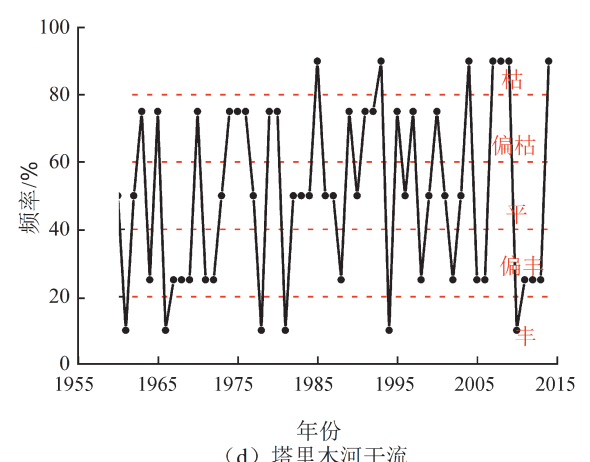
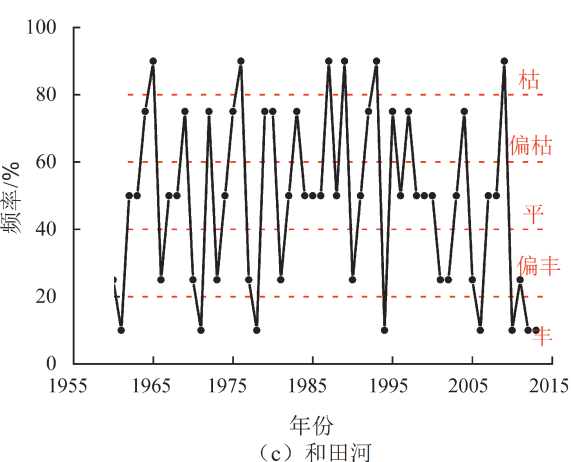
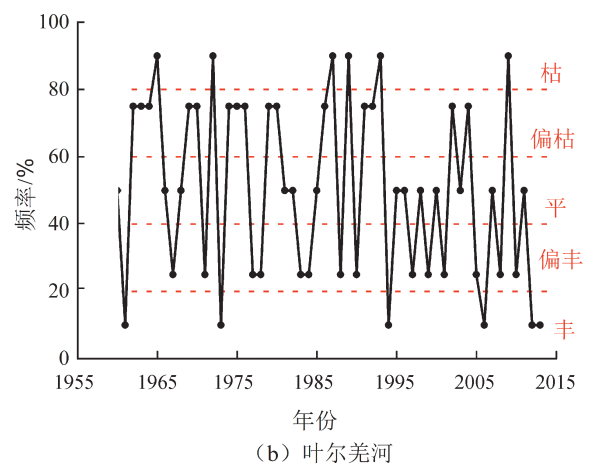
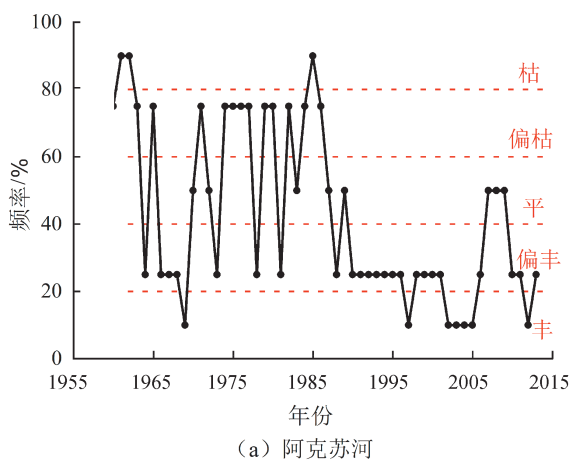


图3 1960—2011年塔里木河年径流丰枯变化过程

表2 $T(t)$ 方程参数及统计检验结果

河流名称	b_0	b_1	b_3	b_4	b_5	b_6	b_{10}	相关系数	统计量	显著性水平
阿克苏河	-82287.5	-7903.9	5.4	-0.1	155341.8	-36673.5	76590.0	0.777	9.581	0
叶尔羌河	-518694.5	-17596.7	6.9	-0.1	1189403.9	-575698.1	282662.6	0.381	1.065	0.402
和田河	-310594.0	-9692.4	3.6	0.0	695332.2	-346012.6	158345.8	0.497	2.063	0.068
塔里木河干流	-346583.4	-14305.2	6.7	-0.1	815811.1	-397146.2	201885.5	0.422	1.358	0.247

程,由图4可知,源流的 $T(t)$ 呈增加趋势,干流的 $T(t)$ 呈减少趋势。这是由于20世纪80年代以来,新疆气候持续变暖,温度升高引起冰川融雪补给的径流量增加,而干流径流呈不显著的减少趋势,说明人类活动的增强已影响到干流 $T(t)$ 的变化过程。

4.2 $P(t)$ 的预测

根据前文介绍的方法分别得到源流及干流的 $P(t)$ 方程及相应方程的相关系数、统计量和显著性水平(表3)。由表3可知,阿克苏河、叶尔羌河、和田河和塔里木河干流对应的生态水文过程周期分别为2、3、7、17年、3、8、9、17年、7、13、17年和3、9、17年。根据生态水流的周期变化特征,制定不同地区的定期水量配置方案,即在丰水年存储富余水量,平水年存储洪峰流量,从而在枯水年进行利用,改善枯水年的缺水现状。

4.3 $R(t)$ 的预测

根据前文介绍的方法,计算地表径流过程中剔除 $T(t)$ 和 $P(t)$ 后的序列,对得到的序列应用ARMA模型进行估计得到径流 $R(t)$ 的模拟序列(表4)。由表4可知,阿克苏河、叶尔羌河、和田河和塔里木河干流的 $R(t)$ 方程的显著性水平均小于0.05,回归方程显著。掌握 $R(t)$ 变化趋势,可以确定洪峰和退水低谷期的水资源配置方案,在时间和空间上实现分段和分地区存储或补给水量,实现有限水资源的高效利用。

4.4 模拟精度评价

表5为ARMA模型和组合回归模型预测合格率和误差分析,图5为ARMA模型与组合回归模型预测结果对比。由表5和图5可见,组合回归模型的模拟效果良好,ARMA模型模拟效果很差。组合回归模型在率定期合格率为80.49%~90.24%,检

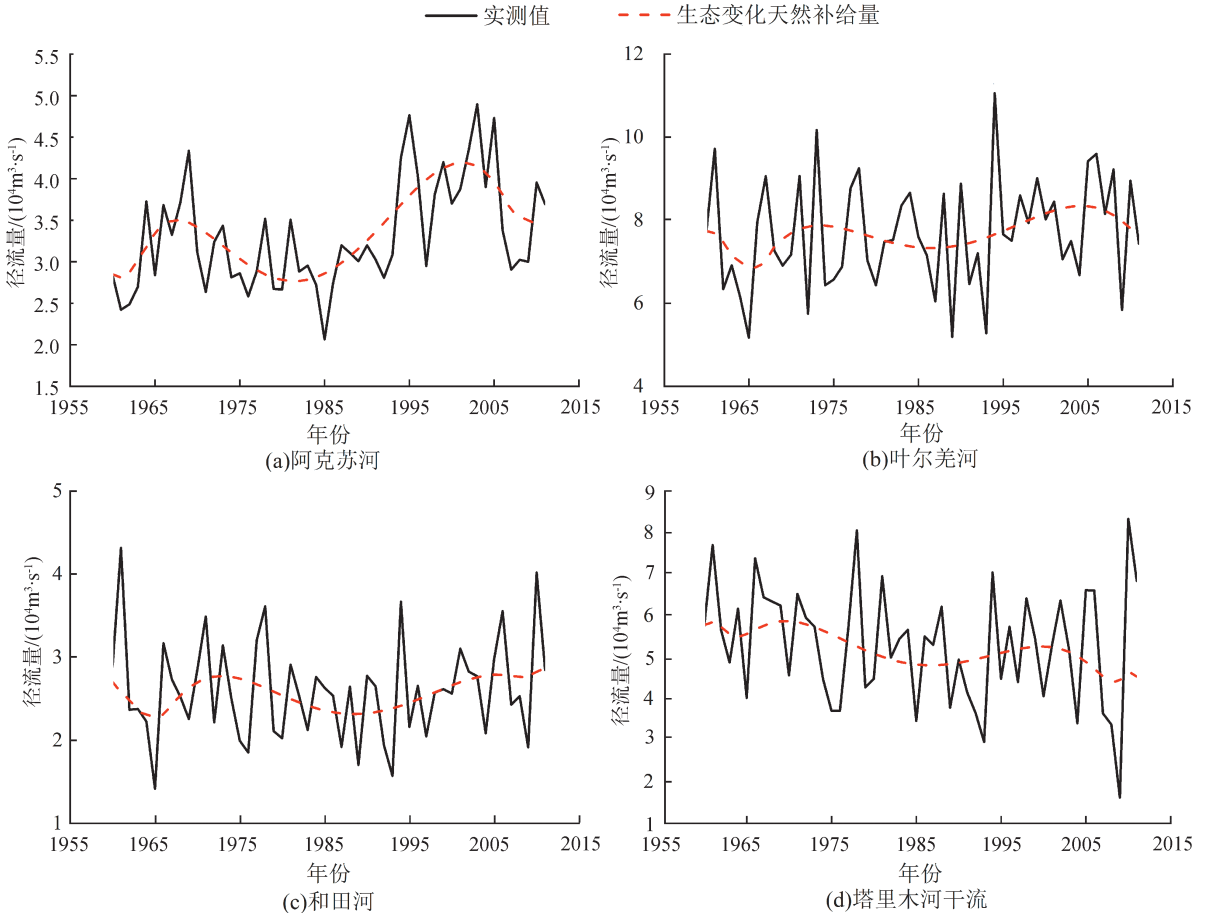


图4 径流量实测值与 $T(t)$ 变化过程

表3 $P(t)$ 方程及统计检验结果

流域名称	$P(t)$ 方程	相关系数	统计量	显著性水平
阿克苏河	$\hat{P}_1(t) = -2483.42 + 0.16x_{2,t} - 0.015x_{3,t} + 1.16x_{7,t} - 4.34x_{17,t}$	0.596	17.321	0
叶尔羌河	$\hat{P}_2(t) = -88.25 - 0.004x_{3,t} + 0.344x_{8,t} - 0.21x_{9,t} - 1.21x_{17,t}$	0.392	32.285	0.071
和田河	$\hat{P}_3(t) = -38.2 + 2.03x_{7,t} - 12.49x_{13,t} + 2.01x_{17,t}$	0.315	25.817	0.033
塔里木河干流	$\hat{P}_4(t) = -2210.2 - 0.10x_{3,t} - 1.15x_{9,t} - 0.165x_{17,t}$	0.452	20.247	0

验期合格率为 63.64% ~ 81.82% ,可见精度均达到丙级以上,可用于参考性预报。经源流和干流对比发现,源流区组合回归模型模拟效果相对较好,尤其是在阿克苏河流域,干流区预报相对误差较大,达到

了 20.19% ,这是由于 20 世纪 70 年代以来,为满足农业发展需求,干流区生态水闸引水和水库调节灌溉的发展改变了天然的生态水流过程,错综复杂的人类活动干扰进一步增加了干流生态水文过程的随

表 4 $R(t)$ 方程及统计检验结果

流域名称	ARMA 模型阶数	生态变化随机性水量方程	相关系数	统计量	显著性水平
阿克苏河	(1,1)	$R(t) = -91.59 - 0.52y_{t-1} + \varepsilon_t - 0.98\varepsilon_{t-1}$	0.256	18.789	0.002
叶尔羌河	(1,2)	$R(t) = 284.45 - 1.11y_{t-1} + \varepsilon_t - 0.70\varepsilon_{t-1} + 0.86\varepsilon_{t-2}$	0.414	79.091	0.029
和田河	(1,1)	$R(t) = -62.93 - 0.41y_{t-1} + \varepsilon_t + 0.99\varepsilon_{t-1}$	0.302	68.193	0.015
塔里木河干流	(4,4)	$R(t) = -483.56 - 0.60y_{t-1} - 0.51y_{t-2} - 0.65y_{t-3} - 0.59y_{t-4} + \varepsilon_t - 0.64\varepsilon_{t-1} - 0.40\varepsilon_{t-2} - 0.61\varepsilon_{t-3} - 0.93\varepsilon_{t-4}$	0.329	42.267	0.027

表 5 ARMA 模型与组合回归模型预测合格率及误差分析

流域名称	预报模型	合格率/%		平均相对误差/%	
		率定期	检验期	率定期	检验期
阿克苏河	ARMA 模型	80.49	63.64	11.65	16.45
	组合回归	90.24	81.82	9.29	13.66
叶尔羌河	ARMA 模型	75.61	54.55	14.95	19.21
	组合回归	90.24	72.73	11.34	18.23
和田河	ARMA 模型	70.73	45.45	16.1	23.85
	组合回归	80.49	72.73	13.02	19.67
塔里木河干流	ARMA 模型	56.1	36.36	19.46	29.44
	组合回归	80.49	63.64	13.38	20.19

注:ARMA 模型的模型阶数为(1,1)。

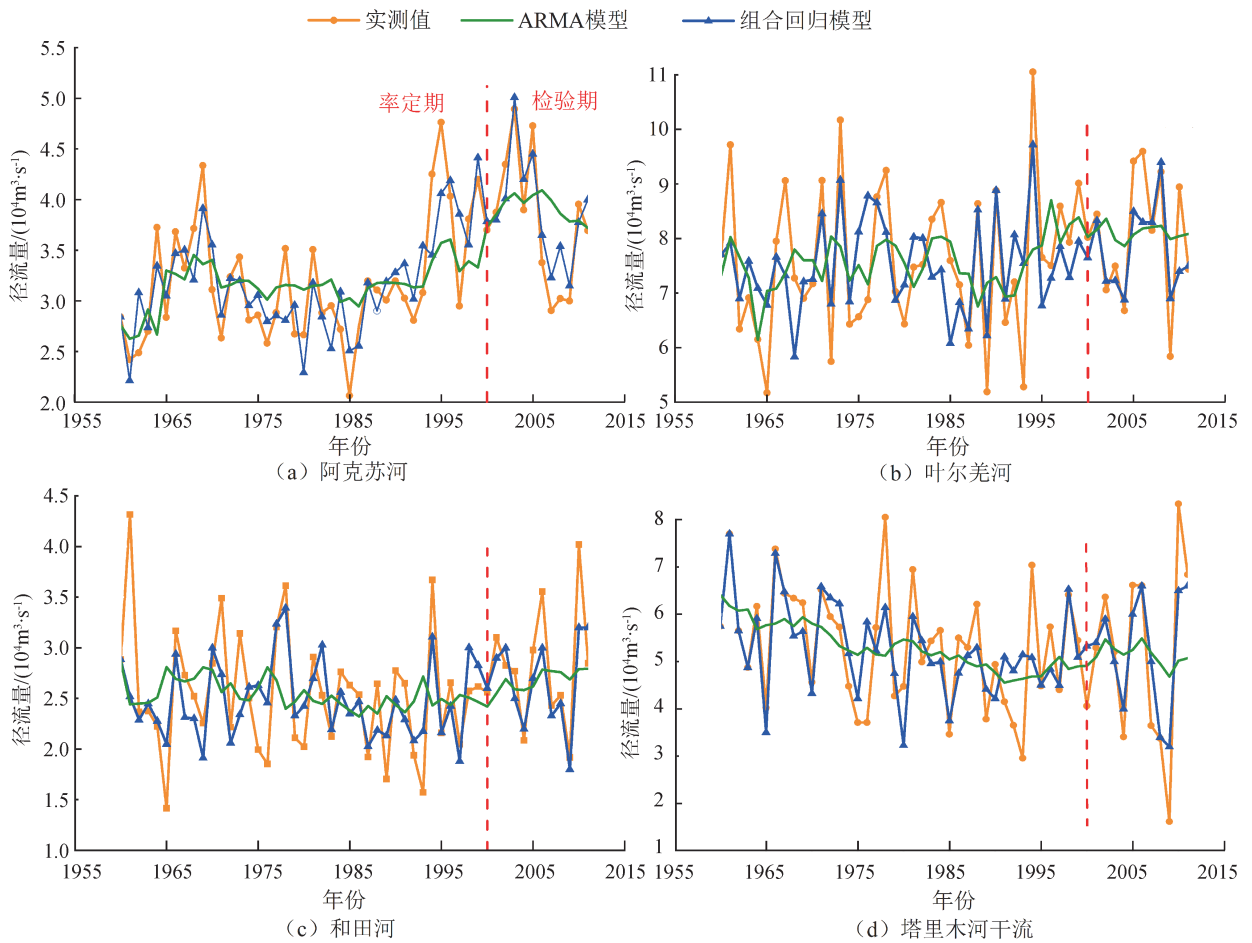


图 5 ARMA 模型与组合回归模型预测结果对比

机性,致使干流生态水流序列趋近非平稳序列,模拟难度较大。

基于组合回归模型,在确定不同利用方式的水流预测方程的情况下,可以基于实时预报的水文年特征,从时间和空间角度出发,建立研究区生态水流适应性利用方案。在丰水年,将生态变化随机性水量一部分用于补给生态用水量,一部分进行存储;在平水年,将洪峰期的生态变化随机性水量用于存储和补给生态用水量;在枯水年,利用前期存储的水量进行补给。根据生态天然补给量的变化趋势进行不定期分段水量补给,根据生态变化周期性水量进行定期分段水量补给,根据不同水平年的配置原则对生态变化随机性水量进行定期和不定期的分段水量分配。塔里木河流域水资源开发利用程度较高,致使周边生态环境严重恶化,结合生态水流情势制定的水量调度方案可以保障塔里木河生态系统的健康发展。

5 结 论

a. 源流区与干流区生态水流变化趋势不一致,呈现源流区径流增加、干流区径流减少的情势。20世纪70年代以来,源流区间耗水量呈现增长趋势,当源流来水频率小于50%时,源流区间耗水量的增加幅度较为明显,当频率大于50%时,区间耗水量减小幅度较为平缓。

b. 相对于ARMA模型,组合回归模型模拟效果比较理想,率定期、检验期的合格率分别为80.49%~90.24%和63.64%~81.82%,可作为参考性预报。根据研究区生态水流情势分析,建立不同水平年的生态水流适应性利用方案,在丰水年,将生态变化随机性水量一部分用于补给生态用水量,一部分进行存储;在平水年,将洪峰期的生态变化随机性水量用于存储和补给生态用水量;在枯水年,利用前期存储的水量进行补给。根据生态天然补给量的变化趋势进行不定期分段水量补给,根据生态变化周期性水量进行定期分段水量补给,根据不同水平年的配置原则对生态变化随机性水量进行定期和不定期的分段水量分配。

参考文献:

[1] DUETHMANN D, BOLCH T, FARINOTTI D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4727-4750.

[2] LESSARD J A, HICKS D M, SNELDER T H, et al. Dam

design can impede adaptive management of environmental flows: a case study from the Opuha Dam, New Zealand [J]. *Environmental Management*, 2013, 51(2): 459-473.

[3] 李晶晶, 华坚. 重大水利工程项目社会稳定风险评估综述[J]. *水利经济*, 2016, 34(4): 4-8. (LI Jingjing, HUA Jian. Review of risk assessment of social stability of key water conservancy projects [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2016, 34(4): 4-8. (in Chinese))

[4] 左其亭. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 18-24. (ZUO Qiting. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water management practices [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese))

[5] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(11): 1072-1082. (YANG Zhifeng, CUI Baoshan, LIU Jingling. Methods and examples of ecological environmental water demand assessment [J]. *Science in China Ser D: Earth Sciences*, 2004, 34(11): 1072-1082. (in Chinese))

[6] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))

[7] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550-559. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 550-559. (in Chinese))

[8] SZEMIS J M, MAIER H R, DANDY G C. An adaptive ant colony optimization framework for scheduling environmental flow management alternatives under varied environmental water availability conditions [J]. *Water Resources Research*, 2015, 50(10): 7606-7625.

[9] OVERTON I C, SMITH D M, DALTON J, et al. Implementing environmental flows in integrated water resources management and the ecosystem approach [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(3-4): 860-877.

[10] WANG J N, DONG Z R, LIAO W G, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: a case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56: 1471-1484.

[11] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 1-8. (XUE Lianqing,

- ZHANG Hui, ZHANG Luocheng, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3) : 189-196. (in Chinese)
- [12] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA) : a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biol, 2010, 55 : 147-170
- [13] SUMMERS M F, HOLMAN I P, GRABOWSKI R C. Adaptive management of river flows in Europe: a transferable framework for implementation [J]. Journal of Hydrology, 2015, 531 : 696-705.
- [14] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J]. 水资源保护, 2017, 33(3) : 31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luocheng, et al. Changes in characteristics of environmental flow in Tarim irrigation area before and after water diversion[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3) : 31-37. (in Chinese))
- [15] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4) : 652-665. (ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: advances and evaluation [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4) : 652-665. (in Chinese))
- [16] 赵海瑞, 张佑民. 国家标准《水文基本术语和符号标准》编制说明 [J]. 水文, 1998 (4) : 51-53. (ZHAO Hairui, ZHANG Youmin. The state standard formulation of hydrological basic terms and symbol standards [J]. Journal of China Hydrology, 1998 (4) : 51-53. (in Chinese))
- [17] 汤成友, 郭丽娟, 王瑞. 水文时间序列逐步回归随机组合预测模型及其应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(6) : 1-4. (TANG Chengyou, GUO Lijuan, WANG Rui. Application of prediction model for stochastic combination of stepwise regression of hydrologic time series [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6) : 1-4. (in Chinese))
- [18] 水利部水文局. 水文情报预报技术手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [19] 陶辉, 毛炜峰, 黄金龙, 等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系 [J]. 水科学进展, 2014, 25(1) : 45-52. (TAO Hui, MAO Weiyi, HUANG Jinlong, et al. Drought and wetness variability in the Tarim River basin and possible associations with large scale circulation [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1) : 45-52. (in Chinese))
- [20] 张程程. 塔里木河源流和干流径流特征及其相关性分析 [J]. 水利规划与设计, 2016(1) : 50-53. (ZHANG Chengcheng. Runoff characteristics and its correlation analysis between headstreams and mainstream in the Tarim River Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2016(1) : 50-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-09-25 编辑: 王 芳)

(上接第 12 页)

- [8] 车伍, 张鹏, 张伟, 等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(6) : 9-14. (CHE Wu, ZHANG Kun, ZHANG Wei, et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6) : 9-14. (in Chinese))
- [9] 李明远, 魏杰, 张武强, 等. 深圳市初期雨水特征分析及控制对策研究 [J]. 广东化工, 2017, 44(10) : 43-46. (LI Mingyuan, WEI Jie, ZHANG Wuqiang, et al. First-flush rainfall in Shenzhen City [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(10) : 43-46. (in Chinese))
- [10] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应 [J]. 生态学报, 2013, 33(18) : 5952-5961. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18) : 5952-5961. (in Chinese))
- [11] HALL M J, ELLIS J B. Waterquality problems of urban areas [J]. Geojournal, 1985, 11(3) : 265-275.
- [12] 黄国如, 曾家俊, 吴海春, 等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应 [J]. 水资源保护, 2018, 34(1) : 8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun, et al. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1) : 8-15. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] MA J S, KHAN S, LI Y X, et al. First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined [C]// Proceeding of the Ninth International Conference on Urban Drainage, Portland: IWA/IAHR, 2002.
- [15] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(5) : 719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5) : 719-731. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-04-11 编辑: 王 芳)