

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222138

拉萨河流域生长期 NDVI 对气象因子响应的时空动态特征

章 阳, 张润润, 郭明辰, 王 钊

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 拉萨河流域是青藏高原典型干旱半干旱流域, 生态系统极为脆弱, 研究植被指数(NDVI)对气象要素变化响应滞时的时空动态, 对于探讨气候变化背景下青藏高原植被对气象因子变化的适应性具有重要意义。基于拉萨河流域 1982~2017 年逐月 NDVI、降水量(P)、平均气温(T)数据, 利用 Pettitt 突变及 Mann-Kendall 趋势检验, 解析生长期 NDVI 及各气象因子的时空动态, 并基于 Pearson 相关分析, 识别生长期 NDVI 对不同气象因子响应滞时, 解析气象因子对 NDVI 时空变化的影响。结果表明, 流域尺度 NDVI 在 1997 年发生显著突变, 且存在由增向减的趋势转变, 流域气候由突变前的“冷湿化”向突变后的“暖干化”转变, 同时其对植被生长的作用由促进转为抑制; 流域内存在两条明显的 NDVI 对气象因子响应的滞时变化带, 即流域西部多年冻土区 NDVI 由突变前对气象因子无响应转为突变后对 P 、 T 响应, 流域南部低海拔地区 NDVI 对 P 在突变后的响应滞时较突变前延长 1 个月, 且对 T 由突变前无响应转为突变后的快速响应, 流域西部永久冻土区 NDVI 对 P 的响应滞时长于流域南部季节冻土区; 突变后 NDVI 对气象因子的响应面积较突变前均有所增加, 气象因子对拉萨河流域植被生长的影响作用增强。

关键词: 植被指数(NDVI); 气候变化; 响应滞时; 时空动态; 拉萨河流域

中图分类号: [TV11]; Q948

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0005-05

1 引言

位于“地球第三极”的青藏高原的植被生态系统脆弱, 极易受到环境因子变化的影响^[1]。近几十年来, 青藏高原气温发生增暖突变^[2], 植被指数(NDVI)整体呈上升趋势, 但在青藏高原南部的部分草地生态系统对气候变化的适应性较差, 有退化的倾向^[3], 虽然针对气候变化对植被分布格局影响的研究较多^[1,3], 但针对气候变化背景下植被对气温 T 、降水 P 等环境因子变化响应滞时的时空动态还缺乏认识。拉萨河位于“地球第三极”的青藏高原中南部, 流域面积 32 871 km², 平均海拔 4 900 m 左右。流域气候具有干湿季分明、日间温差大等特点, 年平均气温为 -4.00~-1.54 °C, 降水量东高西低, 北高南低, 年降水量为 300~550 mm。5 月后随降水和气温的增加, NDVI 呈

增加趋势, 8 月 NDVI 达到全年最大; 9 月后植被开始衰退, NDVI 急剧下降, 即 5~8 月为流域植被的生长期。流域内 58.7% 的区域为季节冻土, 主要集中在河流两侧; 41.3% 的区域为永久冻土, 主要分布在高海拔的山区^[4]。本文通过 Pettitt 检验、Mann-Kendall(MK)趋势检验和 Pearson 相关分析法, 在网格尺度上量化拉萨河流域 1982~2017 年生长期 NDVI 对 P 、 T 变化的响应特征, 识别流域 NDVI 对气象因子变化响应的时空动态模式, 解析青藏高原典型干旱半干旱流域植被对气候变化的适应性转变, 对青藏高原生态恢复和生态建设具有重要的现实意义。

2 数据与方法

2.1 数据获取及预处理

1982~2017 年 NDVI 数据集源于国家科技资源共享服务平台——国家地球系统科学数据中

收稿日期: 2022-09-15, **修回日期:** 2022-11-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B220202035); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0207-02)

作者简介: 章阳(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: 2659673770@qq.com

通讯作者: 张润润(1982-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水文水资源等, E-mail: zhang_rr@hhu.edu.cn

心 (<http://www.geodata.cn>)^[5], 该数据集空间分辨率为 5 km。逐月 P 、 T 数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>)^[6-9], 空间分辨率为 1 km。为了使各要素空间分辨率一致, 使用 ArcGIS 对 P 、 T 数据进行预处理, 形成分辨率为 5 km 的 1979~2017 年拉萨河流域逐月 P 、 T 的时空数据。

2.2 研究方法

首先在流域尺度上, 采用 Pettitt 检验方法分析 1982~2017 年拉萨河流域生长期 NDVI 是否发生显著突变(显著性水平取 0.05)。若有突变, 则以突变年为界, 将整个研究时段划分为突变前后两个时段; 否则, 以整个序列为对象。其次以突变点为分割点, 对网格尺度不同时间段的 NDVI 进行 Mann-Kendall 趋势检验(显著性水平取 0.05), 并采用基于 Pearson 相关系数的响应滞时分析方法计算 NDVI 对 P 、 T 的响应滞时。再对逐网格对应滞时尺度不同时间段的 P 、 T 进行 Mann-Kendall 趋势检验, 并结合 NDVI 与对应滞时尺度 P 、 T 的相关系数, 分析气象因子对 NDVI 变化的影响。

利用 Pearson 相关系数分析 NDVI 与气象因子相应的滞时, 表达式为:

$$R_k = \max\{|R_m, R_{m+1}, \dots, R_{n-1}, R_n|\} \quad m \leq n \quad (1)$$

式中, $R_m, R_{m+1}, \dots, R_{n-1}, R_n$ 分别为 m 个月尺度的 NDVI 与尺度为 $m, m+1, \dots, n-1, n$ 个月的某一气象因子相关系数的绝对值。

R_k 表明 NDVI 与 k 个月尺度气象因子的相关性最大, 若该相关系数显著(相关系数的检验采用 t 检验法, 显著性水平取 0.05), 则表明 NDVI 对该气象因子的响应滞时为 $k-m$ 个月。

滞时计算时先计算 1982~2017 年逐年生长期(5~8 月)内 4 个月尺度的 NDVI, 再将生长期的开始月份前推 0~28 个月, 计算 4 个月尺度的 NDVI 与 4~32 个月尺度 P 、 T 的 Pearson 相关系数, 比较不同时间尺度下相关系数绝对值的大小及其显著性。结果表明, 本文 NDVI 与 12 个月尺度气象因子的相关系数绝对值最大且满足显著性水平, 则认为 NDVI 对该气象因子的响应滞时为 8 个月。

3 结果与分析

3.1 生长期 NDVI 时空分布特征

在流域尺度上, 由 Pettitt 突变检验得拉萨河

流域生长期 NDVI 在 1997 年发生突变。以此, 将整个研究时段分为突变前(1982~1997 年)和突变后(1998~2017 年)两个时段。NDVI 的年际变化见图 1。由图 1 可知, 突变前, NDVI 以 0.008 9/10a 的速率呈不显著的上升趋势; 突变后, NDVI 以 -0.014 3/10a 的速率呈不显著的下降趋势。可见, 拉萨河流域生长期 NDVI 在突变前后存在趋势转变。

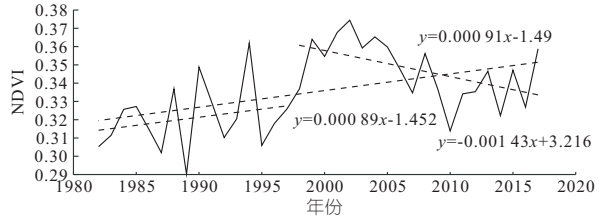


图 1 1982~2017 年拉萨河流域生长期 NDVI 年际变化
Fig. 1 Evolution processes of annual growing period NDVI in Lhasa River Basin during 1982-2017

在网格尺度上, 突变前后 NDVI 的 MK 趋势空间分布见图 2。由图 2 可知, NDVI 在突变前 63.68% 的区域 MK 趋势统计量 Z 值为正, 而在突变后 78.66% 的区域 Z 值为负, 趋势转变的区域主要集中在流域西南部海拔较低的季节冻土地区, 表明低海拔地区的植被在突变前趋向改善, 而在突变后逐渐退化。在 0.05 显著性水平下, 在 1982~1997 年期间 NDVI 有 10.47% 的流域面积呈显著增加趋势, 主要分布于流域内西南部的河谷地区; 仅 2.52% 的流域面积呈显著下降趋势, 零散分布于流域西部和东部。在 1998~2017 年期间, NDVI 仅有 0.2% 的流域面积呈显著增加趋势, 分布较零散; 有 11.60% 的流域面积呈显著下降趋势, 主要分布于流域西部念青唐古拉山脉。

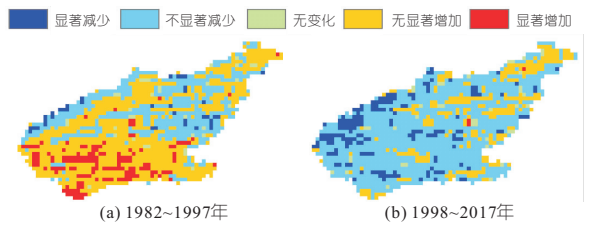


图 2 拉萨河流域生长期 NDVI 变化趋势的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of temporal trends of annual growing period NDVI

3.2 NDVI 对气象因子的响应滞时分析

NDVI 突变前后两个时段生长期 NDVI 对 P 、 T 的响应滞时空间分布见图 3。并将滞时根据其时长划分为短期(0~11 个月)、中期(12~23 个月)、长期(24~32 个月)三个等级, 统计结果见表 1。由于突变前后计算时段不同, 满足 0.05 显著性水平的相关系数绝对值大小在 1982~1997、

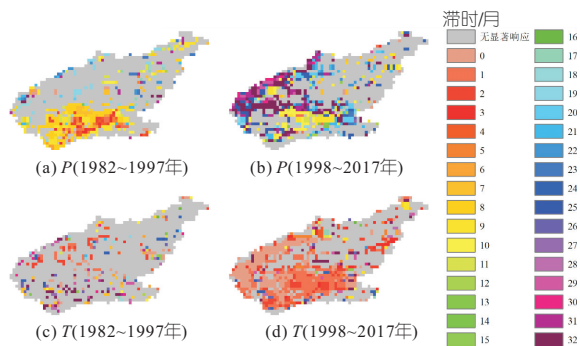


图 3 两个不同分析时段内生长期 NDVI 对 P 、 T 响应滞时的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of lag time between growing season NDVI and P , T in two different periods

表 1 两个不同时段内生长期 NDVI 对气象因子滞时统计

Tab. 1 Summary of lag time in response between growing period NDVI and climatic factors in two different tested periods

气象因子	时期	短期/%	中期/%	长期/%	无响应/%
P	突变前	26.91	6.63	1.45	65.01
	突变后	11.40	10.47	23.99	54.14
T	突变前	9.61	1.59	7.02	81.78
	突变后	46.92	0.73	5.43	46.92

注:短期滞时为 0~11 个月、中期滞时为 12~23 个月、长期滞时为 24~32 个月,无响应代表 NDVI 与多尺度气象因子的最大相关系数未达到 0.05 显著性水平。

1998~2017 年分别为 0.496、0.443。由图 3、表 1 可知,在 0.05 显著性水平下,1982~1997 年 NDVI 对 P 的短期响应滞时主要集中在 8~9 个月,响应面积占流域总面积的 14.86%,主要分布于流域南部低海拔地区,中长期滞时分布较分散;1998~2017 年 NDVI 对 P 的短期响应滞时主要集中在 9~10 个月,滞时较突变前增加一个月,响应面积占流域总面积的 7.42%,主要分布于流域南部低海拔地区,中期滞时分布较分散,长期滞时主要集中在 31~32 个月,响应面积占流域总面积的 15.04%,主要分布于流域西部念青唐古拉山脉。1982~1997 年 NDVI 对 T 的滞时响应较分散;1998~2017 年 NDVI 对 T 的短期响应滞时主要集中在 0~3 个月,响应面积占流域总面积的 42.54%,主要分布在流域西部念青唐古拉山脉及流域南部的河谷地区。

对比前后两个时段内的响应滞时,发现 NDVI 在突变前后对 P 、 T 的响应存在两条明显的变化带:①位于流域西部平均海拔 4 900 m 处的念青唐古拉山脉,其代表永久冻土层植被生长易受到长期 P 和短期 T 变化的影响;②位于流域南部海拔 4 450 m 处的河谷地区,其代表低海拔地区植被生长易受到中短期 P 和短期 T 变化的

影响。流域 NDVI 对 P 的响应面积由 1982~1997 年的 34.99% 升至 1998~2017 年的 45.86%,对 T 的响应面积由突变前的 18.22% 升至突变后的 53.08%,表明 P 、 T 对该区域的植被生长的影响在突变后增强。

3.3 气象因子对 NDVI 时空变化的影响

在不考虑滞时显著性的情况下,每个网格对应滞时尺度下两个不同时段 P 、 T 的趋势分布见图 4。由图 4 可知, P 的 MK 趋势统计量 Z 值呈正的面积百分比由突变前的 100% 降至突变后的 23.99%, T 的 MK 趋势统计量 Z 值呈正的面积百分比由突变前的 23.86% 升至突变后的 100%。在 0.05 显著性水平下,对于 P ,呈显著增加趋势的流域面积由突变前的 14.38% 降至突变后的 3.38%,均零散分布在流域东部,且在突变前后均无显著下降区域。对于 T ,1982~1997 年分别有 15.11%、7.29% 的流域面积呈显著增加和减少趋势,在流域中部和东部均有分布;1998~2017 年有 40.42% 的流域面积呈显著增加趋势,在流域内均有分布,且无显著减少区域。

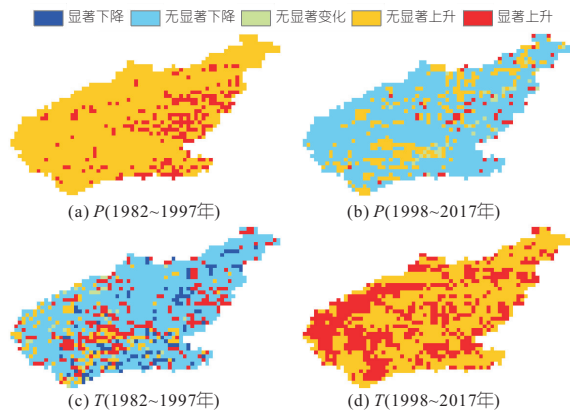


图 4 两个不同时段内滞时尺度的 P 、 T 变化趋势的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of temporal trends of annual growing period P and T in two different tested periods

在不考虑滞时显著性的情况下,突变前后每个网格生长期 NDVI 与滞时对应尺度的气象因子的相关系数见图 5。由图 5 可知,NDVI 与 P 相关系数为正值的面积占比由突变前的 69.45% 升至突变后的 77.76%,NDVI 对 T 相关系数为负值的面积占比由突变前的 56.36% 升至突变后的 76.21%。研究表明,青藏高原在 1997 年发生了更明显的增暖突变,气温的持续升高导致更大的蒸散发^[10],加速了冻土融化^[11]。伴随着多年冻土退化和活动层厚度增加^[12,13],表层土壤的含水率及地下水位降低,植被生长更易受到水分胁迫的影响^[14]。突变后,随着 P 、 T 在突变后“暖干

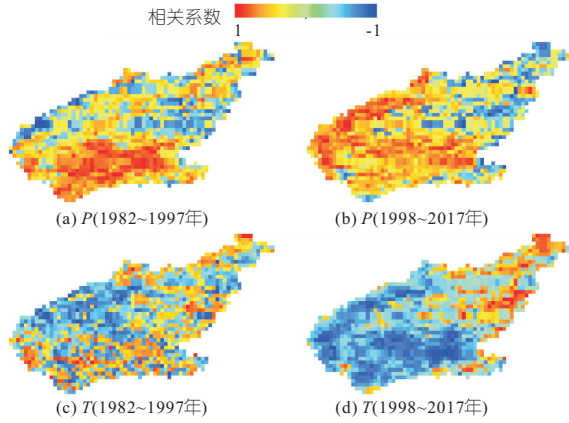


图 5 考虑滞后效应情景下 P 、 T 与生长期 NDVI 的相关系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of correlation coefficients between growing period NDVI and P , T considering lagging effects

化”加剧(图 5),气温升高和降水量减少共同使土壤水分降低^[15],抑制植被生长。

在两个响应变化带中,对于分布在流域西部念青唐古拉山脉的变化带,NDVI 与 P 仅在突变后呈显著正相关,对 T 仅在突变后均呈显著负相关。研究区冰雪融水与大气降水共同补给植被生长所需的水分,在 P 无显著增加的基础上, T 的显著升高(图 5)导致冻土退化,增加了融冰/雪对根区土壤水分的占比^[16],NDVI 对 P 的响应滞时增加。对于分布在流域南部的河谷地区的变化带,NDVI 与 P 在突变前后均呈显著的负相关,NDVI 与 T 仅在突变后呈显著负相关。 T 的持续升高(图 5),使植被生长受到抑制。

4 结论

a. 在流域尺度上,1982~2017 年生长期 NDVI 的突变年份为 1997 年,且在突变前后存在由增向减的趋势转变。突变前“冷湿化”气候对植被生长起促进作用,而突变后气候向“暖干化”转变,其对植被生长起抑制作用。

b. 流域内存在两条明显的 NDVI 对气象因子响应的滞时变化带,其中,流域西部多年冻土区 NDVI 仅在突变后对 P 、 T 响应;流域南部低海拔地区 NDVI 在突变后对 P 的响应滞时较突变前延长 1 个月,且仅在突变后对 T 快速响应。流域西部永久冻土区 NDVI 对 P 的响应滞时长于流域南部季节冻土区。

c. 突变后 NDVI 对 P 、 T 的响应面积较突变前均有不同程度的增加,气象因子对拉萨河流域植被生长的影响作用增强。

参考文献:

- [1] 纪迪. 青藏高原气候变化及其 NDVI 的响应[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [2] 吕少宁,李栋梁,文军,等. 全球变暖背景下青藏高原气温周期变化与突变分析[J]. 高原气象,2010,29(6):1378-1385.
- [3] 朱斌. 青藏高原植被对气候变化及人类活动的响应研究[D]. 南京:南京林业大学,2021.
- [4] NIU F J, ZHENG H, LI A. The study of frost heave mechanism of high-speed railway foundation by field-monitored data and indoor verification experiment[J]. Acta geotechnica,2020,15(3):581-593.
- [5] 徐洋,杨雅萍. 1982-2020 年中国 5 km 分辨率逐月 NDVI 数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版),2022,7(1):99-107.
- [6] DING Y X, PENG S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100[J]. Sustainability,2020,12(2):477.
- [7] PENG S Z, DING Y X, WEN Z M, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100[J]. Agricultural and forest meteorology,2017,233:183-194.
- [8] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth system science data,2019,11(4):1931-1946.
- [9] PENG S, GANG C, CAO Y, et al. Assessment of climate change trends over the loess plateau in China from 1901 to 2100[J]. International journal of climatology,2018,38(5):2250-2264.
- [10] 张成凤,刘翠善,王国庆,等. 基于 Budyko 假设的黄河源区径流变化归因识别[J]. 中国农村水利水电,2020(9):90-94.
- [11] 程国栋,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报,2019,64(27):2783-2795.
- [12] 张中琼,吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. 冰川冻土,2012,34(3):505-511.
- [13] 蒋佑承,刘蛟,商滢. 气候变化对多年冻土区径流组成的影响分析——以长江源区为例[J]. 中国农村水利水电,2021(3):63-68,73.
- [14] JIN X Y, JIN H J, LUO D L, et al. Impacts of permafrost degradation on hydrology and vegetation in the Source Area of the Yellow River on North-eastern Qinghai-Tibet Plateau, Southwest China[J]. Frontiers in earth science,2022,10. DOI:10.3389/feart.2022.845824.
- [15] 路茜. 气候变化对青藏高原表层土壤水分时空格局的影响研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.
- [16] 李云龙. 季节性冻土区融化期积雪消融过程及融水入渗机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.

Responses of Growing Period NDVI (G-NDVI) to Meteorological Factors Spatio-temporal Variations in Lhasa River Basin

ZHANG Yang, ZHANG Run-run, GUO Ming-chen, WANG Zhao

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Lhasa River Basin is a typical arid and semi-arid basin in the Qinghai-Tibet Plateau, where the ecosystem is extremely fragile. It is of great significance to study the spatio-temporal variation of vegetation index (NDVI) in response to the changes of meteorological factors, and to explore the adaptability of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau to the meteorological factors under the background of climate change. Based on the monthly NDVI, precipitation (P), and average temperature (T) time series dataset in the Lhasa River Basin from 1982 to 2017, using Pettitt, Mann-Kendall trend test and Pearson correlation analysis, this paper analyzed the spatio-temporal variation characteristics of growing period NDVI (G-NDVI) and meteorological factors, and identified responses patterns of G-NDVI to climate factors. The results show that the G-NDVI changed abruptly in 1997, and there was a trend shift from increasing to decreasing. The climate of the watershed changed from “wetting-coldling” before the abrupt point to “drying-warming” after the abrupt point, and its effect on vegetation growth changed from promoting to inhibiting. There are two zones in the watershed where the responses patterns of G-NDVI to meteorological factors changed before and after the abrupt point. In the western permafrost areas, G-NDVI shows significant correlation with P and T in the second phase after 1997, i. e., emerging the “responding” function on meteorological factors variation. In the southern seasonal frozen zone, after the abrupt point, time lags of G-NDVI to P were elongated, and meanwhile the “responding” of G-NDVI to T has been triggered. The latency of NDVI response to P in the western permafrost region is longer than that in the southern seasonal frozen zone. In the second phase after 1997, the response area of NDVI to meteorological factors increased compared with that before the abrupt point, and the effect of meteorological factors on vegetation growth in the Lhasa River basin was enhanced.

Key words: NDVI; climate change; lag time; spatio-temporal dynamics; Lhasa River Basin

(上接第 22 页)

Daily Runoff Prediction of Lanzhou Hydrological Station in Yellow River Basin Based on EMD Decomposition

LU Wei^a, WEI Lin-jing^b

(a. College of Science; b. College of Information Science and Technology,
Gansu Agricultural University, Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of runoff prediction, based on the control variable method and the daily runoff data of Lanzhou hydrometric station from August 2001 to December 2019, the models of the LSTM, ARIMA, SVR and XGBoost were used to establish 12 model schemes, including single model, EMD decomposition and reconstruction, EMD decomposition and reconstruction after removing noise components, and evaluation indicators of the 12 schemes were compared. The results show that the EMD sequence decomposition and reconstruction technology and noise component elimination based on Hurst exponent are helpful to improve the prediction accuracy. Compared with the single model, the R_{RMSE} of the model constructed by the former decreased by 15.16% on average, and that of the latter decreased by 28.49% on average. Among the 12 schemes, EMD-SVR-ARIMA with noise components removed is the best model.

Key words: daily runoff forecasting; EMD decomposition; Lanzhou hydrological station; machine learning model

(上接第 34 页)

Effects of Different Layout Forms of Rigid Vegetation Groups on Hydraulic Characteristics of Continuous Bends

ZHANG Chao-yu¹, SUN Xue-lan¹, JI Zi-qing², DUAN Jing-jing¹

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to understand the impact of vegetation groups on the hydraulic characteristics of natural meandering river, this paper designed two kinds of layout forms in which the cluster layout simulated the natural cluster vegetation group, and the uniform layout simulated the artificial regular planting vegetation group. Through the flume experiment, the impact of different layout forms of vegetation on the distribution of flow field, hydrodynamic axis, turbulent kinetic energy and transverse circulation structure in continuous bends was explored. The results show that the flow field in the bend appears obvious velocity partition in which the high velocity area is close to the convex bank, and the low velocity area is attached to the concave bank. Vegetation layout makes the distribution range of high and low flow rate areas have the opposite change rule: the high flow rate area increases, while the low flow rate area decreases. Under the action of the bend, the hydrodynamic axis gradually swings to the convex bank on the upstream side of the bend top, close to the convex bank near the bend top and swings to the concave bank on the downstream side of the bend top, completing a cycle of motion changes. Vegetation layout makes it swing to the middle of the flume and the deviation degree of cluster layout is greater than that of uniform layout. Under the action of the bend, the distribution of turbulent kinetic energy of water flow is small on both sides and large in the middle. On the whole, the layout of vegetation increases the turbulent kinetic energy on the downstream side of the bend top, and the impact of cluster layout is greater than the uniform. The vegetation layout changes the circulation structure of the section, which is manifested by the swing of the vortex core position and the change of the distribution range.

Key words: continuous bends; rigid vegetation; flow field; hydrodynamic axis; turbulent kinetic energy; circulating current