

引文格式: 房博乐, 陈起金, 牛小骥. 轨道几何特征匹配列车定位方法[J]. 测绘通报, 2019(10): 109-113. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0329.

轨道几何特征匹配列车定位方法

房博乐¹, 陈起金², 牛小骥²

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘要: 轨道不平顺和轨距偏差等几何特征是直接反映轨道质量优劣的信息, 它们均是轨道里程的函数, 包含了丰富和低成本的位置信息, 在重复观测中具有一致性。本文对轨道几何特征匹配列车定位方法的可行性进行了评估, 建立了存储于计算机的背景数据库, 然后通过采集待匹配数据和背景数据库进行匹配对比, 获得了满足精度要求的列车位置。该方法为多传感器融合的列车控制系统提供了一种新的定位信息和思路, 可以作为提高列车定位系统稳健性的辅助手段。

关键词: 列车控制; 匹配定位; 轨道不平顺; 轨距偏差; 多传感器融合

中图分类号: P23

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2019)10-0109-05

Track geometry feature matching method for train positioning

FANG Bole¹, CHEN Qijin², NIU Xiaoji²

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Geometric features such as track irregularity and gauge deviation are information that directly reflects track quality. They are all functions of track mileage and contain abundant and low-cost position information, which are consistent in repeated observations. In this paper, the feasibility of the train positioning method based on track geometry feature matching is evaluated, and the background database stored in the computer is established. By collecting the data to be matched and matching it with the background database, the train position which meets the accuracy requirement is obtained. This method provides a new positioning information and idea for multi-sensor fusion train control system and can be used as an auxiliary means to improve the robustness of train positioning system.

Key words: train control; matching positioning; track irregularity; gauge deviation; multi-sensor fusion

随着通信技术尤其是无线电技术的日趋成熟以及人类社会的发展, 人们对轨道交通运输提出了越来越高的要求。目前, 被普遍认同的是发展基于通信的列车控制 CBTC (communication based train control) 系统^[1]。整个列车控制系统的运作都离不开实时获取列车的位置信息, 系统运作的效率及稳定性都取决于列车的实时位置的精确度^[2]。

在轨道交通中, 列车的实时定位主要依靠轨道电路、查询应答器、里程计、全球导航卫星系统 (GNSS) 等技术^[3]。在城市轨道交通及隧道中, 传统的 GPS 定位技术将受到信号遮挡无法发挥作用^[4]; 目前广泛采用的应答-查询器的定位方法信息的传递是间断的, 无法获取连续的位置信息, 且还要安放大量的传感器^[5]; 基于里程计的定位方法直接受到车轮的影响产生误差, 且误差会随列车的运行而累计^[6]; 基于轨道电路的列车定位所存在的比较大的缺陷为它以轨道电路的区段长度作为每一个定位的单

元, 在定位单元内部就会存在定位的盲区^[7]。

目前国内外研究中提出了融合数字地图匹配和其他传感器的列车定位方法, 在建立数字地图数据库时选取了轨道的曲率半径作为信息源, 对本文研究具有一定的参考意义。如文献[8—9]提出了一种使用曲率地图匹配辅助惯性推算的列车定位方法, 文献[10]提出了一种融合曲率地图匹配、雷达和 GPS 的列车定位方法。这些研究将匹配定位应用于列车定位, 提供了一种新思路。此外将曲率半径作为匹配信息会受到轨道自身转弯半径和速度测量精度的限制^[8]。

鉴于列车对精密定位的需求和现有定位手段的缺点, 本文对轨道自身的几何特征如实际轨距偏差、轨道不平顺等多种信息进行匹配定位研究。文献[11—12]将采集轨道几何特征信息的陀螺仪等设备安装于列车转向架或轴箱位置, 通过在低速列车和高铁上进行试验, 多次采集的轨道不平顺差异值不超过

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(41674038)

作者简介: 房博乐(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为组合导航。E-mail: 3359780359@qq.com

通信作者: 牛小骥。E-mail: xjniu@whu.edu.cn

Copyright © 2019 CNKI. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.3 mm,充分验证了前后采集的轨道几何特征信息具有一致性。基于上述研究,本文将通过安装于轨道检测小车上的轨道几何特征信息采集设备来验证匹配定位算法的可行性。本文方法的创新点和优点为:

(1) 轨道不平顺和轨距偏差等几何特征是在工程中被测量以降低其对列车运行的不利影响。但同时这些几何特征均包含了丰富和低成本的位置信息,在目前研究中尚未被发掘和加以利用。

(2) 轨道几何特征信息采集具有一致性和重复性,具有价格低廉、不受隧道等环境影响的优点,并且相较于曲率匹配定位方法,其可匹配的信息源更加丰富。

(3) 本文研究的匹配定位算法为多传感器融合的列车定位系统提供了一种新的思路,可以提高系统的可靠性和定位精度。

1 建立轨道几何特征数据库

轨道几何特征的列车匹配定位方法在实现过程中首先是建立轨道几何特征数据库,即对轨道的几何状态进行测量并存储。钢轨本质上可以看作一条三维空间曲线,其几何形状可以用平面坐标和高程来描述。轨道不平顺本质上是评估检核点间的相对平面位置关系,同理高低不平顺测量本质上要求测量检核点间的相对高程^[13-14]。对轨道的几何状态进行

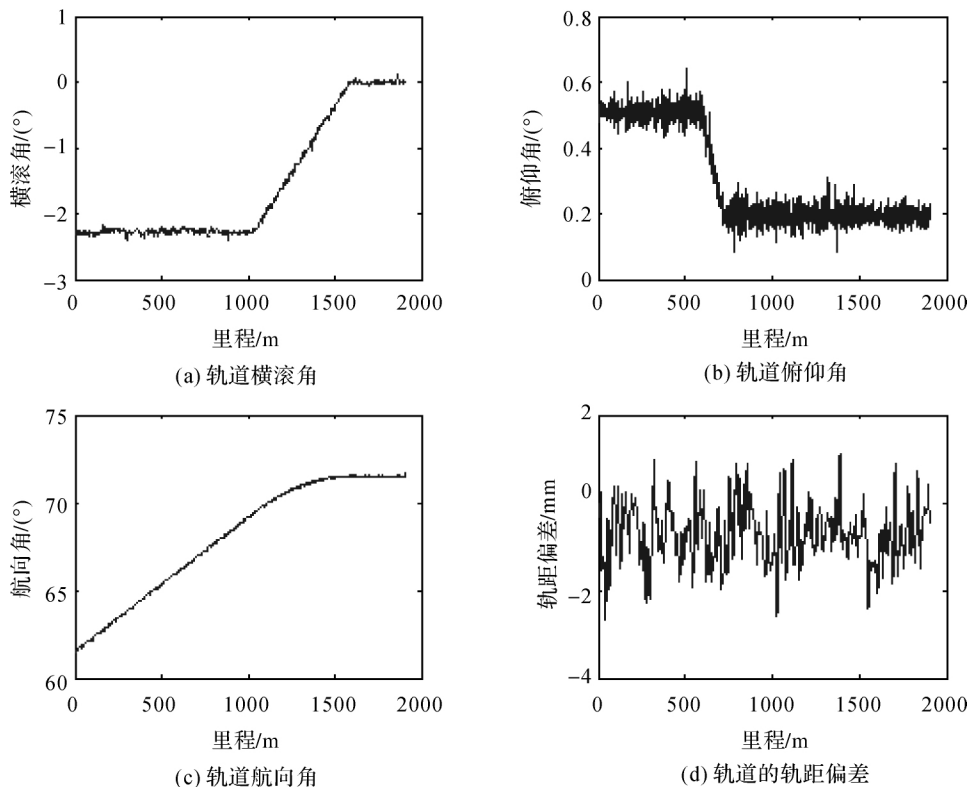
测量本质上是对轨道的定位和定姿。根据这些信息可以由数学公式推导出轨道的几何特征量^[15]。为了更为直观,算法的验证数据将直接采用钢轨的姿态角(航向角、横滚角及姿态角)和轨距偏差作为匹配数据。前期存储于计算机的轨道几何特征数据称为背景数据,后期实时采集的轨道几何特征数据称为待匹配数据。

试验采用的数据于2014年2月在兰新线采集,兰新线设计时速为200~250 km/h。采集设备为基于带有辅助信息的惯性导航轨道检测小车,图1为轨道几何形状测量系统示意图。设备采集的数据是时域的,需要进行时间同步和降采样,其中采样间隔为0.2 m。如果安装设备的列车运行速度为80 m/s,则设备的采样率为400 Hz即可满足要求。



图1 轨道几何形状测量系统

轨道几何特征信息如图2所示。



2 建立最小二乘估计模型

2.1 计算皮尔森相关系数

将待匹配数据 T 分为有限的 n 段, 定义为 $T(i)$, $1 \leq i \leq n$, 每一段的数据长度为 Δd , 选取以 Δd 为窗口长度的背景数据定义为 $R(i)$, $1 \leq i \leq n$ 。通过每次移动背景数据一个采样间隔的距离 l 更新 $R(i)$, 并计算得到其和待匹配数据 $T(i)$ 的皮尔森相关系数。皮尔森相关系数计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中 \bar{x} 为 x 序列均值; \bar{y} 为 y 序列均值; N 为序列 x 和 y 的长度; r 为序列 x 和 y 之间的皮尔森相关系数。轨道的 4 种几何特征量都同时作以上的相关处理, 记录最大的皮尔森相关系数和对应的里程偏差量, 并将结果保存在一个二维矩阵中, 矩阵的行代表每一段的最大皮尔森相关系数, 列代表 4 种几何特征量在某相同段的最大皮尔森相关系数。

2.2 估计里程偏差漂移和中心里程偏差

待匹配数据和背景数据固定的里程偏差值称为中心里程偏差。随着里程的变化, 待匹配数据和背景数据里程偏差的漂移率称为里程偏差漂移因子。将里程偏差量记为 B , 作为观测值建立观测方程为

$$B(i) = x_1 \times [d(i) - d_0] + x_2 + \Delta \quad (2)$$

式中 $B(i)$ 为第 i 段的里程偏差量; $d(i)$ 为第 i 段待匹配数据的中心里程; d_0 为整体待匹配数据的中心里程; x_1 代表随着里程的变化, 背景数据和待匹配数据里程偏差量的漂移因子, x_1 的初值为 0; x_2 代表与里程无关的待估计中心里程偏差量; Δ 为随机误差。

将 $B(i)$ 记为 Z , $[d(i) - d_0, 1]$ 记为 H , $[x_1, x_2]^T$ 记为 X , 则观测方程可以写为

$$Z = HX + \Delta \quad (3)$$

将式 (3) 变形并改为矩阵形式

$$B(i) = [d(i) - d_0, 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \Delta \quad (4)$$

建立描述观测值的期望、观测值间相互的随机相关关系和观测值各自的精度 (即观测值的随机特性) 的随机模型, 如式 (5), 假设 Δ 服从期望为 0 的高斯分布, 即 $\Delta \sim N(0, D)$ 。

$$\begin{cases} E(Z) = HX \\ \text{var}(Z) = D \end{cases} \quad (5)$$

由最小二乘估计法求解待估参数, 符合最小二

乘准则的解即为

$$X_{LS} = (H^T W H)^{-1} H^T W Z \quad (6)$$

由 X_{LS} (即里程漂移因子 x_1 , 中心里程偏差 x_2) 计算更新的里程为

$$d' = d + [x_1 \times (d - d_0) + x_2] \quad (7)$$

式中 d 为待匹配数据的里程列; d_0 为选择的里程差初值对应的里程 (即数据列中间里程); d' 为 d 更新后的里程。

3 试验结果与影响定位精度因素分析

试验选取了 2000 m 距离的轨道几何特征数据, 采样间隔为 0.2 m, 背景数据与待匹配数据的里程偏差真值为 23.245 m。将待匹配数据分为 50 段 (即分割为 50 个独立的窗口, 每个窗口的长度为 40 m), 计算每段待匹配数据和背景数据的皮尔森相关系数, 如图 3 所示。图 3 为第一段待匹配数据 4 种几何特征信息 (横滚角、俯仰角、航向角和轨距偏差) 与背景数据的皮尔森相关系数值, 横坐标表示背景数据在与待匹配数据匹配时的里程移动, 可以看到由 4 种轨道几何特征信息求得的皮尔森相关系数均出现了一个峰值, 代表此时待匹配数据和背景数据相关性最强。

50 段待匹配数据分别和背景数据进行匹配都能得到对应的皮尔森相关系数, 并且都会出现皮尔森相关系数峰值。图 4 表示由最大皮尔森相关系数位置求得的待匹配数据里程修正误差值, 大部分分布在 -0.5 m 至 $+0.5$ m 之间。由第 6 段窗口轨距偏差、第 32 段俯仰角和轨距偏差及第 41 段航向角和轨距偏差求得里程改正误差较大是由于此时的轨道几何特征数据比较平滑, 特征信息不够明显导致。因此需要对 4 种轨道几何特征信息皮尔森相关系数峰值求得的里程修正进行加权, 以减小特征不明显的轨道几何信息对待匹配数据里程修正的影响。将 50 段 4 种轨道几何特征信息匹配求得的里程修正进行加权可以得到 50 个里程修正值, 并将其作为最小二乘模型的观测量, 可以求得里程漂移因子为 -4.7645×10^{-4} , 中心里程偏差为 23.612 m, 中心里程修正误差为 0.41 m。由此可以对待匹配数据的里程进行更新修正。

当匹配定位里程误差在 1 m 之内时则认为定位结果是有效的。图 5 为 4 种轨道几何特征信息进行匹配定位时, 待匹配数据窗口长度不同时的匹配定位准确率。从图 5 可以看到当窗口长度小于 20 m 时, 4 种轨道几何特征信息的匹配定位结果误差都很大。这种情况出现是由于待匹配数据窗口里程长

度过短,包含的轨道几何特征信息不明显从而导致匹配质量下降。同时可以发现航向角匹配定位准确

率相对其他3种轨道几何特征低,这是由于此段数据航向角变化趋势相对平缓,此时匹配误差较大。

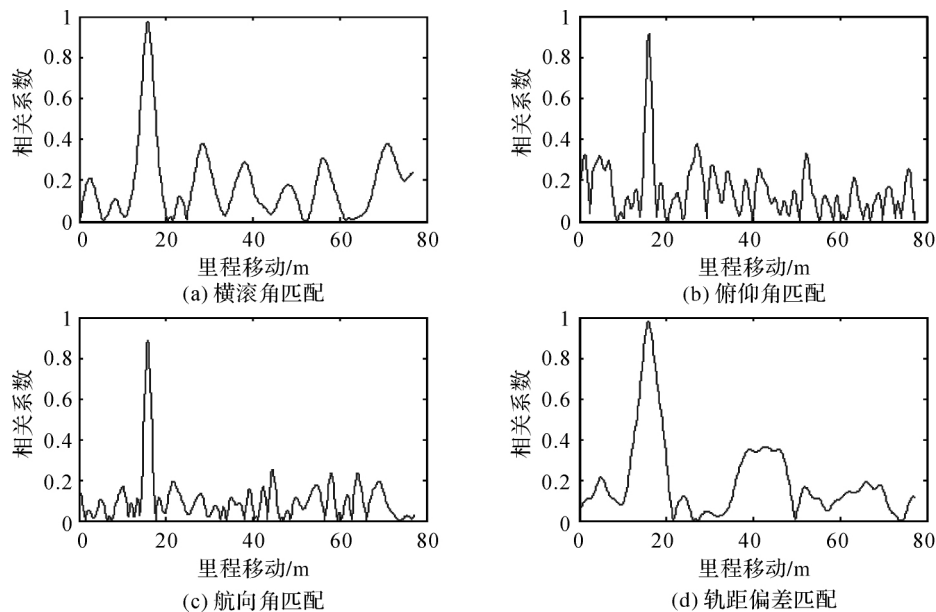


图3 待匹配数据与背景数据皮尔森相关系数

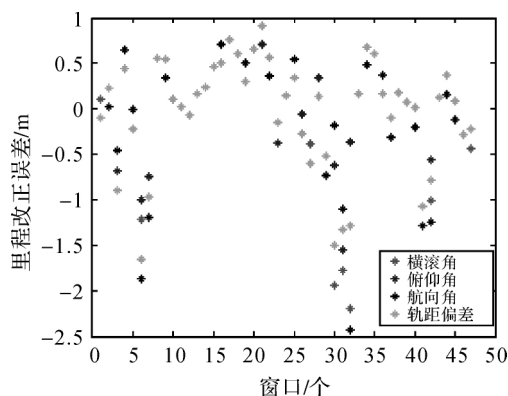


图4 待匹配数据里程修正误差值

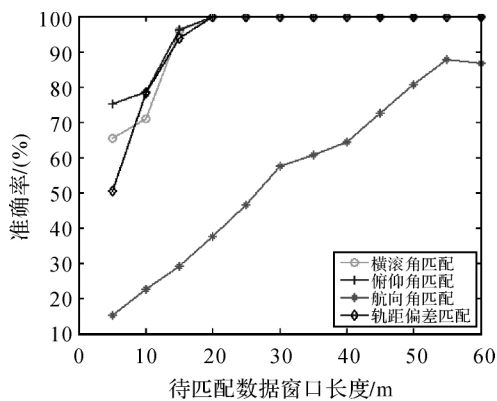


图5 4种轨道几何特征匹配定位准确率

4 结 语

本文针对列车定位问题提出了基于轨道几何特

征的列车匹配定位方法。将轨道姿态角(横滚角、俯仰角及航向角)和轨距偏差等几何信息看作是里程维度上的一个伪随机信号,这一随机信号通过前期测量获取并存储于列车计算机中作为背景数据,当列车在上述轨道上运行时,可实时测量上述几何信息作为待匹配数据。通过待匹配数据进行分段与背景数据计算皮尔森相关系数并求取每个窗口内的里程差;基于最小二乘估计理论估计出了里程偏差漂移因子和中心里程偏差两个参数;并由这两个参数对待匹配数据的里程进行了更新。根据试验分析得到,待匹配数据里程长度需要大于20m,否则将因待匹配数据包含的几何特征信息不明显而无法满足列车定位精度。

此次试验将传感器安装在轨道检测小车上采集数据并进行仿真试验,同时对匹配算法的可行性进行了评估,但是在列车行驶中,必然会由于颠簸等因素引入更多的随机噪声,使得一些轨道几何特征信息匹配定位出现误差,在匹配前对数据的噪声处理和几何特征信息的筛选还需进一步研究和解决。同时,采用合适的抗差算法来检测出误匹配对算法的可靠性也是至关重要的。在未来研究中,将寻求解决上述问题,最终将几何轨道匹配算法融合到以惯导为主的列车定位系统中。

参考文献:

- (C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
[1] ZHU L, YU F R, NING B, et al. Communication-based train

- control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology ,2014 ,63(5) :2162-2172.
- [2] 刘进,吴汶麒. 轨道交通列车定位技术[J]. 城市轨道交通研究,2001,4(1) :30-34.
- [3] 闫剑平,步兵. 高速铁路列车定位技术的研究[J]. 北京交通大学学报,1999,23(5) :73-76.
- [4] MARAIS J, MEUNIER B, BERBINEAU M. Evaluation of GPS availability for train positioning along a railway line [C] // Vehicular Technology Conference. [S.l.]: IEEE, 2000.
- [5] 肖建,李治. 关于列车空位系统的探讨[J]. 铁道学报,1995(A01) :22-26.
- [6] MALVEZZI M, TONI P, ALLOTTA B, et al. Train speed and position evaluation using wheel velocity measurements [C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. [S.l.]: IEEE, 2001: 220-224.
- [7] 刘锋. 基于通信的列车控制模式下的列车定位新技术[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(4) :48-53.
- [8] SAAB S S. A map matching approach for train positioning. I. development and analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 49(2) :467-475.
- [9] SAAB S S. A map matching approach for train Positioning. II. application and experimentation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 49(2) :476-484.
- [10] GERLACH K, RAHMIG C. Multi-hypothesis based map-matching algorithm for precise train positioning [C] // International Conference on Information Fusion. [S.l.]: IEEE, 2009.
- [11] WESTON P F, LING C S, ROBERTS C, et al. Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles [J]. Rail and Rapid Transit 2016, 221(1) :75-88.
- [12] WESTON P F, LING C S. Monitoring lateral track irregularity from in-service railway vehicles [J]. Journal of Raie and Rapid Transit 2016, 221(1) :89-100.
- [13] 李阳腾龙,岑敏仪,马国治. 高速铁路无砟轨道分段测量的数据处理研究[J]. 测绘通报,2016(10) :31-34.
- [14] 刘江,蔡伯根,唐涛,等. 基于 GPS 的列控轨道地图数据生成方法研究[J]. 测绘学报,2011,40(1) :111-117.

(责任编辑: 郭新新)

(上接第 16 页)

参考文献:

- [1] 杨苏新,林卉,侯飞,等. 利用混合像元分解估测喀斯特地区植被覆盖度[J]. 测绘通报,2014(5) :23-27.
- [2] 张珍珍,熊康宁,黄登红. 近 30 年来梵净山植被覆盖时空变化及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2018,25(2) :183-189.
- [3] 汪桂生,仇凯健. 利用 MODIS NDVI 进行淮南矿区植被覆盖度动态监测[J]. 测绘通报,2018(6) :34-40.
- [4] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报,2015,70(5) :705-716.
- [5] 刘斌,孙艳玲,王中良,等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. 自然资源学报,2015,30(1) :12-23.
- [6] 张韵婕,桂朝,刘庆生,等. 基于遥感和气象数据的蒙古高原 1982—2013 年植被动态变化分析[J]. 遥感技术与应用,2016,31(5) :1022-1030.
- [7] LIU H P, ZHANG Y X, ZHANG X P. Monitoring vegetation coverage in Tongren from 2000 to 2016 based on Landsat7 ETM+ and Landsat8 [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências 2018, 90(3) :2721-2730.
- [8] 郭继凯,吴秀芹,董贵华,等. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. 干旱区研究,2017,34(3) :621-629.
- [9] 潘颖,林杰,佟光臣,等. 2004—2014 年太湖流域植被覆盖时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(1) :37-45.
- [10] 宋启堃,熊晓洪,杨军. 黔南地区 2009-08—2010-04 四季连旱分析[J]. 贵州气象,2010,34(S1) :72-73.
- [11] 黄桂东,余燕. 黔南州 2013 年和 2011 年两次夏季干旱对比分析[J]. 贵州气象,2014,38(6) :20-22.
- [12] 宋鹏飞,季民,李刚. 山东省近 10 年植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J]. 测绘通报,2018(12) :109-113.
- [13] 曹旭娟. 青藏高原草地退化及其对气候变化的响应[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- [14] 安佑志. 基于遥感的中国北部植被 NDVI 和物候变化研究[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [15] 杨永辉,王智平,佐仓保夫,等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(6) :667-671.
- [16] 黄星. 黄河流域典型区域气候因子和植被变化及二者响应关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.

(责任编辑: 马保卫)