

基于小波与 R/S 方法的库车绿洲最高和最低温度时间序列分析

白长江^{1,2}, 高敏华^{1,2*}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆乌鲁木齐 830000; 2. 生态经济与资源利用研究室, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要 利用库车绿洲 1951—2014 年气象观测资料, 应用 Morlet 小波处理和 R/S 分析方法, 进行气温变化趋势分析。结果表明, 小波处理方法能够较好地突出历史时间序列的变化特征; Hurst 指数可以分析出未来气候演变趋势, 总体而言, 平均最高温度将会缓慢降低, 而平均最低温度将会缓慢升高, 一方面有利于研究区农作物的生长, 但同时也有利于害虫越冬, 森林、农田将面临威胁。

关键词 小波分析; R/S 分析; 气温变化; 农作物; 库车绿洲

中图分类号 P467 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)11-0045-04

Analysis of Maximum and Minimum Temperature Time Series in Kuqa Oasis Based on Wavelet Analysis and R/S Methods

BAI Chang-jiang^{1,2}, GAO Min-hua^{1,2} (1. College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830000; 2. Ecological Economics and Resource Utilization Research Office, Urumqi, Xinjiang 830000)

Abstract Using the meteorological observation data of Kuqa Oasis from 1951 to 2014, Morlet wavelet analysis and R/S analysis were used to analyze the trend of temperature change. The results showed that the wavelet processing method could better highlight the changing features of historical time series. Hurst index could analyze the trend of future climate evolution. Overall, the average maximum temperature would slowly decrease, while the average minimum temperature would slowly increase. On the one hand it was conducive to the growth of crops in the study area, but also conducive to the pests overwintering. Forests and farmland would be threatened.

Key words Wavelet analysis; R/S analysis; Temperature change; Crop; Kuqa Oasis

研究表明, 自 20 世纪以来全球地表温度具有不断升高趋势, 且最近 50 年尤为明显^[1-3]。新疆地域辽阔, 三山夹两盆地理分布格局形成了复杂的区域气候系统, 库车绿洲紧邻塔克拉玛干沙漠和天山山脉, 从南到北形成了沙漠—绿洲—山地景观过渡带^[4-5]。分析库车绿洲多年气温变化规律对新疆地区乃至其他干旱区绿洲生态的健康发展具有重要的意义^[6-10]。

小波分析是研究气候变化规律的有效手段^[11-14]; 而 R/S 分析方法对于提取历史气候时空序列的变化特征和长期记忆过程方面具有诸多优势^[15]。因此, 综合利用小波处理方法、R/S 分析方法作为补充, 有利于更好地掌握库车绿洲具体天气变化及变化趋势。笔者在借鉴前人研究成果的基础上, 选择库车县境内的气象站点历史资料, 综合运用小波分析和 R/S 分析法对年和季节平均最高、最低温度的时空变化进行分析, 探究其变化周期, 并预测其未来的发展趋势, 致力于促进库车绿洲农业生产和经济社会发展。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于新疆库车县境内、天山中部南麓、塔河流域中北部, 属于渭干河—库车河绿洲的一部分, 地理坐标为 41°04'31"~41°50'56"N, 82°40'52"~83°38'04"E (图 1)。研究区内包含一个国家标准气象站, 位于县城以北 1.5 km 处。该气象站海拔 1 081.9 m, 附近区域气候干旱、日较差大, 年均温度为 10.5~14.4℃, 极端最高值为 41.5℃, 年均降水仅为 46.5 mm, 年均蒸发 1 227.8 mm, 蒸降比高达 26.4。土壤主要为潮土和草甸土。天然植被以芦苇 (*Phragmites australis*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)、花花柴

(*Karelinia caspica*) 等为主。

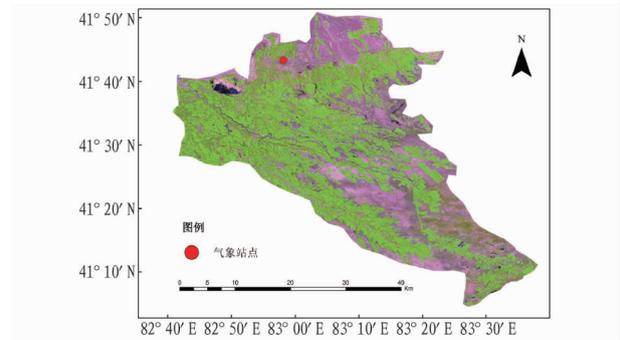


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

1.2 数据源 气象数据主要来源于中国国家级地面观测站 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 选取库车气象站 1951—2014 年月值平均最高、最低温度资料。以 12 个月为一个统计单位计算研究区年最高、最低温度, 同时以每 3 个月为一个单位统计各季节最高、最低温度。

1.3 研究方法

1.3.1 小波分析 小波处理的原理是用一簇函数来表示或逼近某一变化值, 即可以更为有效解译、提取气候变化趋势, 无论从多尺度构型和主周期^[9]及研究气候多时空尺度结构和变化特性等方面^[8]都具有显著效果。利用小波处理能够很好地解译获取气候数据的时空和频谱特性, 能够解译分析气温在时空多尺度上的发展规律, 探索获取隐含的时序特征^[7]。

数据处理部分因考虑到小波函数的独有特性, 相比于实型小波变化系数, 采取复小波函数中变换系数作为判别多时空尺度周期性变化规律, 能够更好地消除时序上的噪音, 使最终的分析结果更接近真实值。很显然, Morlet 小波处理有助于对气候数据进行多时空尺度细化分析。

作者简介 白长江(1993—), 男, 内蒙古科右中旗人, 硕士研究生, 研究方向: 地图学与地理信息系统。* 通讯作者, 副教授, 硕士生导师, 从事生态经济与资源利用相关研究。

收稿日期 2017-12-27

利用小波处理方法对已知气象气候长序列时序数据进行多尺度变换,针对一些复杂过程综合分析其全局和局部变化规律,从而确定气候变化各节点和趋势。该研究基于库车气象站逐月平均最高、最低温度连续记录数据,选择 Morlet 方法进行小波处理,获得过去气候时序数据的变化周期和变化节点。通过采用该方法发现小波功率谱便于突出时序函数在全局上的周期性演化,而总体小波功率谱则更倾向于突出时序函数和序列的平均特征。该研究以年均最高温度为例,进行小波分析。

1.3.2 R/S 分析。为能够更好地表达和判断某一时间或时空序列是否存在趋势强度,英国科学家 Hurst^[15] 提出了基于重标极差(R/S)分析方法的 Hurst 指数,目前该指数方法普遍应用于气候、水文等学科领域研究中。

R/S 分析的基本原理为:对于一个水文序列 $\{x(t)\}$, 首先应满足:

$$R(n)/S(n) = an^H \quad (1)$$

式中, $R(n)/S(n)$ 为重标极差; n 为增量子序列长度; a 为常数; H 为 Hurst 指数。其具体计算过程如下:

$$\text{均值序列 } X_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X(k), m = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\text{累计离差 } X(k, m) = \sum_{i=1}^k (x(i) - x_m), 1 \leq k \leq m \quad (3)$$

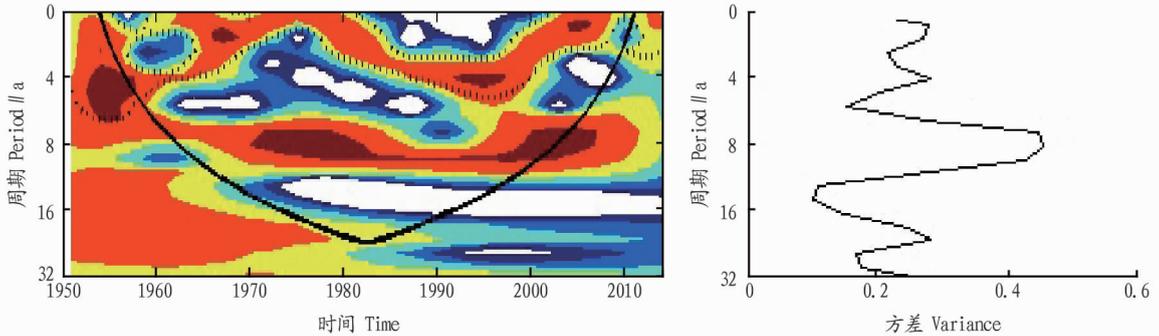


图2 1951—2014年库车绿洲平均最高温度小波功率谱(a)和小波方差(b)

Fig. 2 The wavelet power spectrum(a) and variance(b) of average maximum temperature in Kuqa Oasis from 1951 to 2014

从小波方差图发现(图2b),年均最高温度有1.44、4.24、11.04和19.32年的周期,其中1.44和4.24年周期通过了95%置信度检验曲线,11.04和19.32年周期则没有通过,说明1.44和4.24年的周期是具有全域性的显著周期。根据表1可知,年、季节平均最高、最低温度大部分具有1.44年的全域性显著周期,年和夏季、秋季最高温度均具有4.24年的全域显著周期,而夏季平均最低温度则没有全域性的显著周期。

2.2 平均最高、最低温度变化趋势分析

2.2.1 历史变化趋势。小波函数处理应用于区域气候、水文等数据分析能够方便探析各研究要素的变化。该研究利用小波方法对库车绿洲的历史气温进行变化趋势分析,发现用长周期温度时空序列中低频成分来表达库车绿洲历史温度变化能够取得较好的解译效果。

首先,针对1951—2014年库车绿洲最高、最低温度进行了统计分析,发现年均最高温度具有不断上升趋势,而年均

$$\text{极差序列 } R(m) = \max X(k, m) - \min X(k, m), 1 \leq k \leq m \quad (4)$$

$$\text{标准差序列 } S(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x(k) - x_m)^2}{m}} \quad (5)$$

如果 $R(m)/S(m)$ 满足式(1),说明某一序列 $\{x(k)\}$ 存在 Hurst 指数现象,应用最小二乘法,并根据研究中气候时空序列数据,采用 $R(m)/S(m)$ 和 $k(1 \leq k \leq m)$ 进行线性拟合获得 Hurst 指数。

大量研究证明,Hurst 指数为0.5,表示函数序列可以被视为完全独立;当 Hurst 指数为0.5~1.0,表示函数变化趋势与前期时间序列具有一致性,Hurst 指数越大,可以认为其变化越趋近;同时如果 Hurst 指数越接近0,则表明时序函数变化趋势与过去变化趋势相反。因此,可根据 Hurst 指数大小来判断时序函数和序列的变化周期及大致趋势。

2 结果与分析

2.1 小波功率谱 由图2可知,在0~4、4~8、8~16和16~32年时年均最高温度变化显著,且0~4、4~8年时功率谱通过了95%置信曲线,能够覆盖了整个时域;8~16年尺度存在于1970—1984和1995—2004年;16~32年尺度存在于1980—1984年。

表1 1951—2014年库车绿洲平均最高、最低温度的全局小波功率谱周期
Table 1 The global wavelet power spectral period of average maximum and minimum temperature in Kuqa Oasis from 1951 to 2014

序号 No.	要素 Element	周期 Period//a
1	年平均最高温度	1.44、4.24
2	年平均最低温度	1.44
3	春季平均最高温度	1.84
4	春季平均最低温度	1.64
5	夏季平均最高温度	2.24、4.24
6	夏季平均最低温度	—
7	秋季平均最高温度	1.44、4.24
8	秋季平均最低温度	1.44
9	冬季平均最高温度	1.44
10	冬季平均最低温度	3.04

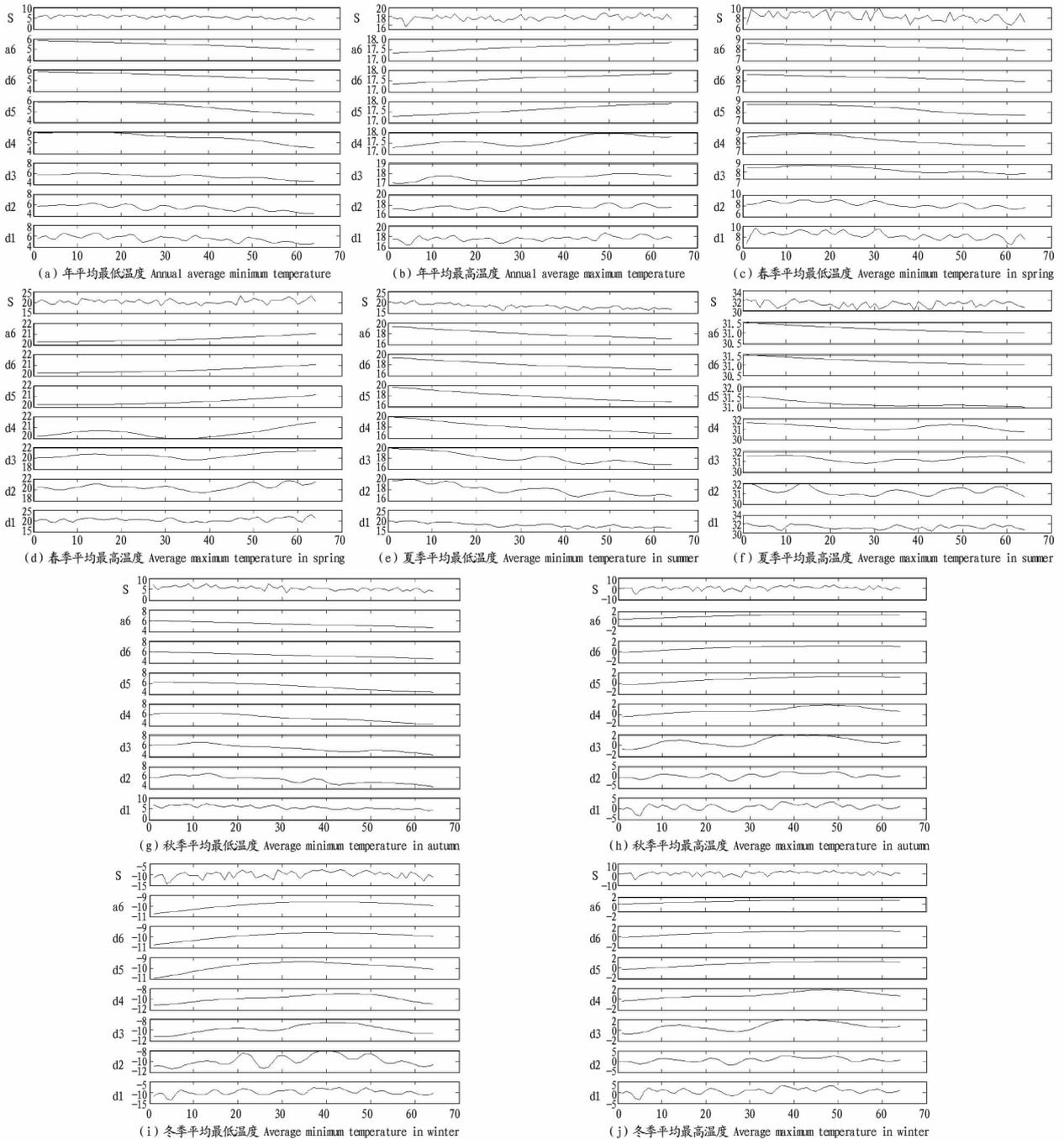
最低温度则表现出不断下降趋势。其中年均最高温度的变率为0.100℃/10a,略小于年均最低温度的下降幅度(0.215℃/10a)。对比各季节气温变化发现,春季、秋季、冬季平均

最高温度分别以 0.109、0.172、0.210 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的幅度升高;夏季平均最高气温则以 0.036 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的变化速率降低。与此不同,在历史统计周期内每年各个季节平均最低温度都有不同程度降低趋势,变化速率分别为 -0.465、-0.200、0.324、0.009 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

用离散小波分解得到气候序列数据的低频要素。小波分解次数由样本序列容量决定,库车绿洲降水量历史时空序列数据涉及到 1951—2014 年,即可分解至第 6($\log_2 64$)层。经过试验分析,在小波分解 6 次其获得的序列变化趋势结果最为精确。

考虑到库车绿洲降水变化特征,基于小波分解原理,采

用图 3 可知,库车绿洲气温序列变化趋势随着样本数量



注:小波分解图中横坐标代表统计时长(a);纵坐标代表各年份平均温度($^{\circ}\text{C}$);d1 ~ d6 代表小波分解层数,其中 a6 为 1951—2014 年温度小波重构变化,S 为 1951—2014 年实际温度变化

Note:The abscissa in wavelet decomposition represents the statistic duration(a);the ordinate represents the average temperature in each year($^{\circ}\text{C}$);d1 - d6 represent the wavelet decomposition layers,where a6 is the temperature wavelet reconstruction change from 1951 to 2014,S is actual temperature change from 1951 to 2014

图 3 1951—2014 年库车绿洲平均最高、最低温度序列历史变化趋势

Fig. 3 Historical trend of maximum and minimum temperature series of the Kuqa Oasis during 1951 – 2014

的增多愈加明显。从小波分解变化曲线,获悉在最近历史时期内,年平均最低温度呈现出逐渐降低趋势,夏季平均最高温度呈现出降低趋势,且变化更为明显;春季、夏季、秋季、冬季平均最低温度同样呈现降低趋势。而同期年均最高温度以及春、冬季平均最高温度、秋季平均最低温度则出现升高趋势。

2.2.2 未来平均最高、最低温度变化趋势。经分析(表2),1951—2014年年均最高、最低温度 Hurst 值及季节平均最高、

最低温度时间序列 Hurst 值均小于0.5,甚至 Hurst 值小于0.3,说明年、季节平均最高、最低温度序列具有强烈的反持续性。对于库车绿洲年际历史气温而言,未来年均最高温度会缓慢降低;年均最低温度会缓慢升高。而对于历史各季节平均温度变化而言,除夏季其余各时期平均最高温度会缓慢降低;夏季平均最高温度及各时期平均最低温度将会缓慢升高。总体而言,平均最高温度将会缓慢降低,而平均最低温度将会缓慢升高。

表2 库车绿洲平均最高、最低温度序列未来变化趋势

Table 2 The future trends of mean maximum and minimum temperatures series in Kuqa Oasis

要素 Element	历史变化趋势(1951—2014年) Historical trend	Hurst 指数 Hurst index	未来变化趋势 Future trends	R^2
年平均最高温度 Annual average maximum temperature	升高	0.311 3	下降	0.799 1
年平均最低温度 Annual average minimum temperature	下降	0.283 4	升高	0.880 8
春季平均最高温度 Average maximum temperature in spring	升高	0.278 5	下降	0.843 1
春季平均最低温度 Average minimum temperature in spring	下降	0.276 6	升高	0.653 2
夏季平均最高温度 Average maximum temperature in summer	下降	0.233 6	升高	0.552 5
夏季平均最低温度 Average minimum temperature in summer	下降	0.462 8	升高	0.918 8
秋季平均最高温度 Average maximum temperature in autumn	升高	0.275 4	下降	0.758 7
秋季平均最低温度 Average minimum temperature in autumn	下降	0.262 5	升高	0.673 6
冬季平均最高温度 Average maximum temperature in winter	升高	0.260 6	下降	0.701 7
冬季平均最低温度 Average minimum temperature in winter	下降	0.260 2	升高	0.685 9

注: R^2 是 R/S 趋势线拟合方程的决定系数

Note: R^2 is the coefficient of determination of the R/S trend line fitting equation

3 结论与讨论

(1) 针对 1951—2014 年库车绿洲最高、最低温度进行小波分析,发现年均最高温度具有不断上升趋势,而年均最低气温则表现出不断下降趋势,与多数学者有关于新疆地区多年气候变化研究结果基本一致^[16-18]。

(2) 总体上年均温度以 $0.053\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 变化速率缓慢下降,这与胡汝骥等^[19]、张山清等^[20]、施雅风等^[21] 研究认为新疆气候由暖干向暖湿转型的结论稍有不同,表现在库车绿洲年均最高温度确实有上升趋势,但同时年均最低温度具有下降趋势,后者绝对数值略大于前者。其中春、夏、秋 3 个季节历史最低温度的降低对研究区历史气候变化趋势有较大影响,冬季气温变化则表现出相反的趋势。由于库车绿洲所处地理位置及复杂天气条件,全球气候变暖能够从多大程度上影响库车县及周围地区有待进一步研究。

(3) 根据气象站的平均最高、最低温度的历史变化趋势及 Hurst 指数值,推测出库车绿洲未来平均最高温度将会缓慢降低,而平均最低温度将会缓慢升高,将有利于减少发生极端灾害天气及农作物生长,但同时研究区内森林、草地、农田将面临病虫害威胁^[22-28]。

参考文献

[1] TEAM C W, PACHAURI R K, REISINGER A. IPCC fourth assessment report [M]. Geneva: IPCC, 2007.
 [2] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314.
 [3] 马鹏里, 王若升, 王宝灵, 等. 我国西北地区地面最高和最低气温变化及分布的特征 [J]. 高原气象, 2002, 21(5): 509-513.
 [4] 钱云, 赫毓灵. 新疆绿洲 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.
 [5] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲-沙漠过渡带: 以策勒绿洲-沙漠过渡带为例 [J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 195-202.

[6] 迪丽拜尔·艾拜都拉, 海米提·依米提, 王志明. 塔里木盆地绿洲分布与水源的关系 [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2006, 23(2): 216-218.
 [7] 叶茂, 张鹏, 王炜, 等. 塔里木河流域上游三源流径流变化趋势分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 10-14.
 [8] 刘晓梅, 闵锦忠, 刘天龙. 新疆叶尔羌河流域温度与降水序列的小波分析 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 566-570.
 [9] 张军涛, 李哲, 郑度. 温度与降水变化的小波分析及其环境效应解释: 以东北农牧交错区为例 [J]. 地理研究, 2002, 21(1): 54-60.
 [10] 陈豫英, 陈楠, 王式功, 等. 50a 来宁夏可利用降水的时空变化及其对生态环境的影响 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 748-754.
 [11] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
 [12] 杨怀杰. 测井数据的小波分析方法研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
 [13] 张晶. 漳泽水库年径流周期分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
 [14] 赵利红. 水文时间序列周期分析方法的研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
 [15] 陈昭, 梁静溪. 赫斯特指数的分析与应用 [J]. 中国软科学, 2005(3): 134-138.
 [16] 谢姆斯叶·艾尼瓦尔, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 近 50 年来塔里木盆地南、北缘干湿状况变化趋势分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 40-46.
 [17] 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 174-178.
 [18] 满苏尔·沙比提, 米娜瓦尔·斯拉吉丁, 吐尼沙古丽·牙生. 近 40 年来新疆策勒绿洲气候变化特征分析 [J]. 水文, 2009, 29(1): 89-92, 96.
 [19] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近 50a 新疆气候变化对环境的影响评估 [J]. 干旱区地理, 2001, 24(2): 97-103.
 [20] 张山清, 普宗朝, 伏晓慧, 等. 气候变化对新疆自然植被净第一性生产力的影响 [J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 905-914.
 [21] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
 [22] 邓振镛, 张强, 王润元, 等. 农作物主要病虫害对甘肃气候暖干化的响应及应对技术的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1281-1287.

着 Cr(VI) 初始浓度的增加, Cr(VI) 去除率先增大后迅速减小, MCTS 的吸附容量呈逐渐增大的趋势。这是由于当 MCTS 投加量一定时, 吸附剂表面活性位点数基本相同, Cr(VI) 初始浓度越高, 活性位点与 Cr(VI) 相互接触的机会越大, 吸附容量越大, 但由于初始浓度高, 导致去除率减小。

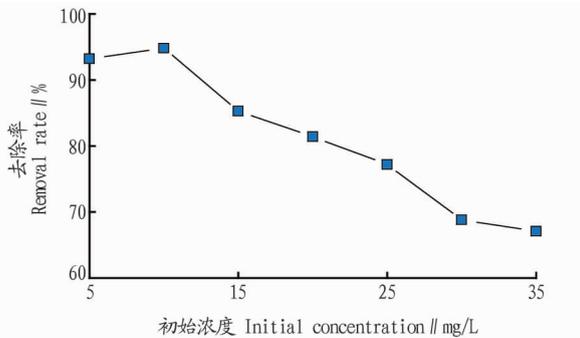


图 4 Cr(VI) 初始浓度对去除率的影响

Fig. 4 Effect of initial concentration on the removal rate of Cr(VI)

2.3.3 时间对 MCTS 吸附效果的影响。由图 5 可知, MCTS 对 Cr(VI) 的吸附特别快, 当吸附时间达 5 min 时去除率就达 55.6%, 吸附时间在 10 min 之内去除率急剧增加, 10 min 时去除率已达 93.8%, 在 70 min 时去除率达到最大, 为 99.6%, 继续延长吸附时间, 去除率会慢慢减小, 这是由于吸附解析是一个动态平衡过程, 可能是一部分 Cr(VI) 达到平衡后被重新释放出来。

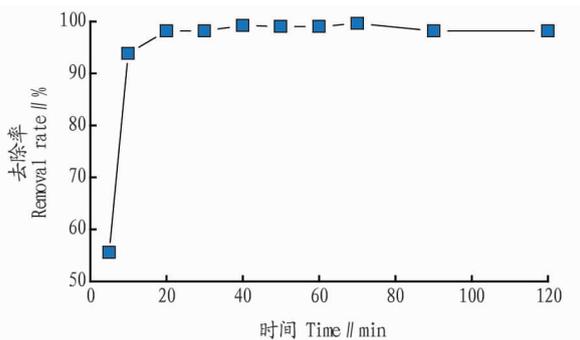


图 5 时间对 Cr(VI) 去除率的影响

Fig. 5 Effect of time on the removal rate of Cr(VI)

2.3.4 温度对 MCTS 吸附效果的影响。由图 6 可知, 随着温度的变化, MCTS 对 Cr(VI) 的去除率变化不大, 说明 MCTS 较稳定, 是一种良好的吸附材料, 不容易被温度改变吸附效果。

3 结论与讨论

以 CTS 与 Fe_3O_4 为主要原料, 采用反相悬浮聚合方法成功制备吸附剂 MCTS; 利用傅里叶红外光谱与扫描电镜分析对

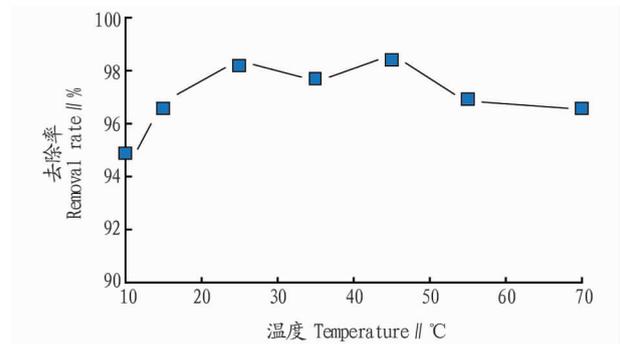


图 6 温度对 Cr(VI) 去除率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on the removal rate of Cr(VI)

MCTS 产物的化学基团与表面形态结构进行表征, 并将其用于水中 Cr(VI) 的吸附, 得出以下结论。

(1) 傅里叶红外光谱分析表明, Fe_3O_4 与 CTS 共聚成功, 聚合形成的 MCTS 是一种高分子聚合物; 扫描电镜表明, MCTS 呈现出立体圆球状, 体表均一, 有利于吸附水中污染物。

(2) 将 MCTS 用于吸附去除水体中 Cr(VI), 取得了较好的吸附效果。当 Cr(VI) 初始浓度为 10 mg/L, MCTS 投加量为 0.05 g, 吸附时间为 70 min, 水浴温度控制为 45 °C 时, 不调节 pH, 去除率最大可达 98.6%。

参考文献

- [1] 曾淦宁, 武晓, 郑林, 等. 负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中 Cr(VI) 的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 530-536.
- [2] 汤洁, 王卓行, 徐新华. 铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2650-2657.
- [3] 马亚梦, 王洋洋, 谭秀民, 等. Cr(VI) 污染生物修复研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(22): 176-178, 257.
- [4] 梁龄予, 王耀晶, 闫颖, 等. 玉米芯吸附水中 Cr(VI) 的特性及 SEM-EDS 表征分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 305-309.
- [5] 马欢欢, 马叶, 周建斌. 载铁改性活性炭对溶液中六价铬 [Cr(VI)] 的吸附研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(9): 91-96.
- [6] 王尚军, 陈海珍, 赵宝艳. 菌草负载活性炭对水中 Cr(VI) 的吸附性能[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(1): 142-145.
- [7] 张雪彦, 金灿, 刘贵锋, 等. 重金属离子吸附材料的研究进展[J]. 生物质化学工程, 2017, 51(1): 51-58.
- [8] 杨思敏, 尹华, 叶锦韶, 等. 黑曲霉分泌微生物絮凝剂的效果及其絮凝特性[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(1): 26-31.
- [9] ZHU G C, LIU J F, YIN J, et al. Functionalized polyacrylamide by xanthane for Cr(VI) removal from aqueous solution[J]. Chemical engineering journal, 2016, 288: 390-398.
- [10] 张双杰, 邢宝林, 黄光许, 等. 柚子皮水热炭对六价铬的吸附[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2731-2737.
- [11] 刘素文. 壳聚糖基磷酸灰石对重金属离子的吸附研究[D]. 保定: 河北大学, 2012.
- [12] 李冰洁. 壳聚糖/纤维素复合微球的制备及其吸附性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [13] 傅明连, 林旺, 陈彰旭, 等. 磁性壳聚糖微球的制备及其吸附行为研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 145-147.
- [14] LI J X, JIANG B Q, LIU Y, et al. Preparation and adsorption properties of magnetic chitosan composite adsorbent for Cu^{2+} removal[J]. Journal of cleaner production, 2017, 158: 51-58.
- [15] 田欣欣. 丙烯酸改性壳聚糖磁性颗粒去除水产养殖废水中氨氮的研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2013.

(上接第 48 页)

- [23] 霍治国, 李茂松, 王丽, 等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1926-1934.
- [24] BEBBER D P, RAMOTOWSKI M A T, GURR S J, 等. 农作物病虫害在全球变暖中向极地扩散[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(3): 80-86.
- [25] 李超, 高迎新. 气候变化对我国农业气象灾害与病虫害的影响[J]. 农

- 业工程, 2016(2): 50-51.
- [26] 赵淼, 赵闯, 孙振中, 等. 近 20 年来我国农作物病虫害时空变化特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 965-975.
- [27] 刘文栋, 葛意恬, 何燕. 气候变化对水稻病虫害发生发展趋势的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 243-246.
- [28] 李伟君, 王春乙, 赵蓓, 等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(51): 263-271.