

# 生态修复工程背景下西宁市土地利用 变化及其气候响应

尚晓英<sup>1,2</sup>, 朱陵晶<sup>1,2</sup>, 谢启玉<sup>3</sup>, 郭强<sup>3</sup>, 张婷华<sup>3</sup>, 金继明<sup>1,4</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

3. 青海省西宁市气象局, 青海 西宁 810016;

4. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100)

**摘要:**生态修复工程是改善生态环境的重要举措, 青海省西宁市自1989年大力实施“南北山绿化工程”以来, 其土地利用发生巨大变化, 对局地气候产生重要影响。选择1989年、1994年、1999年、2004年、2009年、2014年和2018年的土地利用数据, 在分析西宁市土地利用变化特征的基础上, 借用WRF模式对生态修复工程土地利用变化对气候影响进行模拟分析。结果表明: 土地利用类型变化速率最大的是混交林和农田, 农田面积在1989年—2018年减少了152 km<sup>2</sup>, 而混交林从1989年的4 km<sup>2</sup>增加到了2018年的83 km<sup>2</sup>。“绿化工程”对地表温度和气温的降温作用具有季节性差异, 风速最大降低量可达0.56 m/s。研究可为生态脆弱区生态环境工程开发提供参考。

**关键词:** 土地利用变化; WRF模式; 西宁市; 气候变化; 生态修复工程

**中图分类号:** P339

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2022)06—0223—07

## Temporal and Spatial Changes of Land Use in Xining and Effects on Climate Change Under the Background of Ecological Restoration Project

SHANG Xiaoying<sup>1,2</sup>, ZHU Lingjing<sup>1,2</sup>, XIE Qiyu<sup>3</sup>, GUO Qiang<sup>3</sup>, ZHANG Tinghua<sup>3</sup>, JIN Jiming<sup>1,4</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Xining Meteorological Bureau of Qinghai, Xining, Qinghai 810016, China;

4. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

**Abstract:** Ecological restoration project is an important measure to improve the ecological environment. Since 1989, Xining City of Qinghai Province had vigorously implemented the “greening project of the North and South Mountains”, and its land use had undergone great changes, which has influenced the local climate. The land use data of 1989, 1994, 1999, 2004, 2009, 2014 and 2018 were selected. Based on the analysis of the characteristics of land use change in Xining, WRF model was used to simulate and analyze the climate impact of land use change in ecological restoration project. The results showed that the highest rate of land use change was mixed forest and farmland. The farmland area decreased by 152 km<sup>2</sup> from 1989 to 2018, while the mixed forest increased from 4 km<sup>2</sup> in 1989 to 83 km<sup>2</sup> in 2018. In addition, the effect of “greening project” on surface temperature and air temperature cooling had seasonal differences, and the maximum reduction of wind speed could reach 0.56 m/s. This study can provide reference for the development of ecological environment engineering in ecologically fragile areas.

**Keywords:** land use change; WRF model; Xining; climate change; ecological restoration project

收稿日期: 2022-07-13

修稿日期: 2022-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507000); 国家自然科学基金项目(91637209)

作者简介: 尚晓英(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化和气候变化数值模拟。E-mail: doris\_shang@163.com

通讯作者: 金继明(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事气候变化和水文过程数值模拟与分析方面的研究工作。E-mail: jiming\_jin@163.com

青海省西宁市位于青海省东部、青藏高原东北部,处于青藏高原与黄土高原的分界线上,是典型的生态脆弱区,其系统抗干扰能力弱,易于发生生态退化且难以自我恢复<sup>[1-3]</sup>,因此生态环境建设是西宁市发展的重要内容。西宁市从二十世纪八十年代(1989 年)大力实施“南北山绿化工程”以来,南北两山森林覆盖率提高了 67.8%,森林蓄积量显著提高<sup>[4]</sup>。大规模的植被绿化工程会对局地气候环境产生反馈,如:植树种草既可以改变地表反照率,影响温度,又能改变地表粗糙度,影响风速等<sup>[5]</sup>。与此同时,气候是生态环境中最重要自然因素,是自然植被生存发展的先决条件,良好的气候条件有助于植被存活生长,有助于生态脆弱区的植被恢复重建<sup>[6-7]</sup>。因此,加强生态修复工程对局地气候环境的影响研究,是尊重自然气候规律,科学实施植被恢复重建和生态修复治理的前提,也是评价生态治理对局地气候利弊影响的重要基础。

目前国内外有关生态脆弱区土地利用变化的气候效应研究已有很多,土地利用变化与气候的关系错综复杂涉及自然、社会经济等要素,是一个复杂的动态变化过程<sup>[8-10]</sup>,且对生态环境系统可持续性发展具有重要意义<sup>[11-13]</sup>。例如:Halder 等<sup>[14]</sup>利用区域气候模型 RegCM4.0 对印度中部 1951 年—2005 年土地利用变化引起的地表温度及降雨变化进行了模拟,发现夏季季节性降水减少,而区域内高温上升了 1.0℃~1.5℃。Wang 等<sup>[15]</sup>对京津冀的城市扩张导致的温室效应进行模拟,结果表明,土地利用变化对区域气温变化具有显著影响。Wang 等<sup>[16]</sup>利用 WRF 区域气候模式(the Weather and Forecasting Model)模拟分析了中国近三百年来土地利用变化情况,发现森林转变为草地和耕地为主要变化,通过模式的模拟探讨了几百年来土地利用变化导致的气候中气温和气压的改变。辛秋玲等<sup>[17]</sup>利用 WRF 模式研究了在大规模生态恢复工程:“绿色长城”的影响下,华北平原沙尘暴发作期间的粉尘变化。WRF 模式可以利用真实的气象环境进行模拟。它不仅有高效的计算平台,同时也反应出了近代在物理、数值模拟和数据同化的最新模型成果。目前,WRF 模式在下垫面改变对区域气候影响的相关研究中,发挥了重要的作用<sup>[18-19]</sup>。

总体上,大多数研究对典型生态脆弱区西宁市在生态修复工程背景下的土地利用变化时空演变状况缺乏研究,尤其在城市化及生态修复工程背景下不能很好体现“绿化工程”对西宁气候的影响。本

研究主要探讨青海省西宁市的区域尺度土地利用变化及其气候效应,主要通过建立西宁市于 1989 年—2018 年间土地利用变化特征方案,采用 WRF 模式模拟分析了西宁市土地利用变化对 1994 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2018 年的 1 月、4 月、7 月和 10 月的关键气候要素变化的影响,本研究可为生态脆弱区生态环境建设提供参考。

## 1 研究区概况

西宁市位于青海省东部,青藏高原东北部,地处湟水河及三条支流的交汇处。西宁市区海拔 2 261 m,面积 476.5 km<sup>2</sup>,规划建成区面积 118 km<sup>2</sup><sup>[20-22]</sup>,如图 1 所示为研究区高程图,采用 2020 年全球 30 m 分辨率 DEM 数据。西宁市属高原高山寒温性气候,气压低、日照长、雨水少、蒸发量大、太阳辐射强、昼夜温差大、无霜期短、冰冻期长,冬无严寒、夏无酷暑;年均蒸发量约为 1 363.6 mm,年均降水量约 398.8 mm,年均日照约 2 572 h,年均气温约为 6.1℃,夏季极端最高气温为 36.5℃,最低气温约为 -23.8℃<sup>[19, 21-23]</sup>。西宁地区雨热同季,约 56% 的降水集中在夏季,1961 年—2018 年,西宁夏季降水量呈不显著的增加趋势;近 58 a 来,西宁地区日照时数呈减少趋势;1961 年—2018 年,西宁夏季平均风速总体呈减小趋势,阶段性变化特征明显<sup>[20, 24]</sup>。

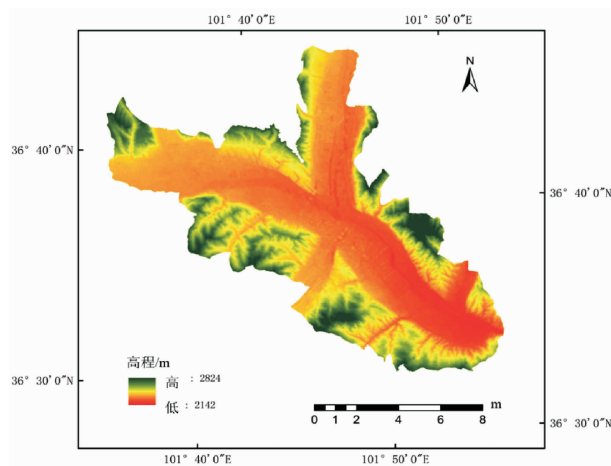


图 1 研究区位置图

## 2 研究方法

### 2.1 方案设计

本研究基于区域气候模式 WRF,选取合适的分辨率和参数化方案,运用 ERA-Interim 数据驱动模式,对 1994 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2018 年“绿化工程”土地利用变化产生的气候效应

进行模拟评估。本研究旨在探究西宁市“绿化工程”引起的土地利用变化及其对气候的影响,因此设置两组数值模拟方案如表 1 所示,方案一:采用模拟期当年的土地利用类型作为下垫面条件;方案二:保持城市范围不变,将每年工程实施区域土地利用改成 1989 年数据。将方案一与方案二的数值模拟结果相比来描述“绿化工程”土地利用变化的气候效应。

| 表 1 模拟方案 |                                                |
|----------|------------------------------------------------|
| 方案名称     | 情景描述                                           |
| 方案一      | 以真实的土地利用类型作为下垫面条件对气候效应进行数值模拟                   |
| 方案二      | 以当年真实的城市土地利用和 1989 年的其他土地利用为下垫面条件,即剔除城市化对气候的影响 |

2.2 区域气候模式

采用 WRF 模式中用于气象模拟研究的动力学求解器 ARW 对青海省西宁市土地利用变化的气候效应进行模拟。WRF 应用尺度非常宽广,从几十米到几千公里均可。本研究采用三层嵌套,分辨率分别为:25 km、5 km 和 1 km,采用的参数化方案内容主要包括 Dudhia 短波辐射方案、RRTM 长波辐射方案、UW 边界层方案、CAM5. 1 云物理方案和 Noah 陆面过程方案。本研究关注于土地利用变化对区域气候的影响,因此对 Noah 陆面模式(Noah Land Surface Model, Noah-LSM)进行简要介绍。Noah-LSM 由 OSU LSM 发展而来,相比于其他方案更合理、稳定且复杂,是大多数研究者普遍认可的陆面模式<sup>[25-27]</sup>。模式包含一层植被冠层的植被模块和四层土壤模块,植被模块包含叶面积指数、植被覆盖度及地表发射率等物理参数,四层土壤厚度分别为 0.1 m、0.3 m、0.6 m 和 1.0 m<sup>[26,28]</sup>。下面从模式的热力学过程和水文过程进行详细介绍。

采用 Mahrt 和 Ek 在 1984 年提出的简单线性陆面能量方程确定地表温度<sup>[29]</sup>,将地表和植被作为一个整体,利用土壤温度扩散方程计算土壤热通量<sup>[28]</sup>:

$$C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K_t(\theta) \frac{\partial T}{\partial z}] \tag{1}$$

式中: $C$  为土壤容积比热,  $J/(m^3 \cdot K)$ ;  $K_t$  为土壤热导率,  $W/(m \cdot K)$ , 是土壤含水率  $\theta$  的函数。

土壤水文模型中土壤含水率预测采用 Richard 方程<sup>[28]</sup>:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K}{\partial z} + F_\theta \tag{2}$$

式中: $\theta$  为土壤湿度百分比, %;  $D$  为土壤水分扩散系数和  $K$  为水力传导系数, 均为  $\theta$  的函数;  $F_\theta$  为土壤水分的源和汇(即降水、蒸发和径流)。

模式中实际总蒸发量( $E$ ) 包含土壤表层蒸发( $E_{dir}$ )、植被冠层截留蒸发( $E_c$ ) 及冠层和根部蒸腾( $E_t$ ), 即  $E = E_{dir} + E_c + E_t$ , 其中<sup>[28]</sup>:

$$E_{dir} = (1 - \sigma_f) \beta E_p \tag{3}$$

$$E_c = \sigma_f E_p \left( \frac{W_c}{S} \right)^n \tag{4}$$

$$E_t = \sigma_f E_p B_c \left[ 1 - \left( \frac{W_c}{S} \right)^n \right] \tag{5}$$

式中: $\sigma_f$  为植被覆盖度, %;  $E_p$  为潜在蒸发, mm;  $W_c$  为冠层截留水含量, mm;  $S$  为最大冠层容量, mm;  $\beta$  和  $B_c$  代表阻抗因子。

2.3 数据来源

西宁市 1989 年—2018 年土地利用类型和气象数据来自青海省气象局, 初始土地类型分为 12 类, 包含: 有林地、灌木林地、疏林地、其他林地、天然草地、河渠、水库(坑塘)、城镇用地、农村居民点、其它建设用地、裸土地和旱地。为了将土地利用数据应用到 WRF 模式中, 土地利用类型重分类为落叶阔叶林、混交林、稠密灌丛、草原、农田、水、低密度城市和高密度城市。

输入 WRF 模式的历史气候数据是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的气候再分析数据集: ERA-Interim, 涵盖 1979 年至 2019 年 8 月 31 日, 分辨率为  $0.5^\circ$ 。

气象数据主要包含西宁市(辖三县)1989 年—2018 年的历史和实时气象观测资料, 主要包括温度、湿度、气压和降雨等逐日数据。

2.4 模型验证及评价

从青海省西宁市气象局获取的 1989 年—2018 年的气象数据与模拟期 1994 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2018 年的 1 月、4 月、7 月和 10 月的模拟结果对比, 进行 WRF 模式的验证评估, 利用决定系数( $R^2$ ) 评估模式的模拟效果。 $R^2$  越接近 1 表明模型的模拟值与实测值越吻合, 当大于 0.5 时, 模拟结果可以接受<sup>[30]</sup>。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

西宁市“绿化工程”对土地利用类型影响最大为混交林、农田和草地, 如图 2 所示。农田是 1989 年西宁市最大的土地利用类型, 面积约为  $176 \text{ km}^2$ ,

占比约为 53.8%；第二大土地利用类型为草地，面积约为 49 km<sup>2</sup>，占比约为 15%；面积占比在 1989 年不足 1.5% 的混交林，在 2018 年占比达 25.4%，面积约为 83 km<sup>2</sup>，是当年草地面积的 1.9 倍，农田面积的 3.5 倍。从西宁市空间分布上来看，1989 年至 2018 年西宁市东北和西南两侧农田呈减退趋势，而混交林则呈增加趋势。

在 1989 年—2018 年期间，西宁市大部分地区月平均植被叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 有增加的趋势，特别是西宁市的西南与西宁市北部区域

(如图 3 所示)。而西宁市中部区域的月平均叶面积指数没有太大变化，这可能跟此地区为西宁市的主要城市所在区有关。叶面积指数变化与青海省西宁市“绿化工程”的实施区域及时间相吻合，叶面积指数在 2004 年发生较为明显的变化，其 2004 年混交林的占比增加了 14.1%，面积增加了 46 km<sup>2</sup>。在季节尺度上，LAI 在冬季 (1 月) 与春季 (4 月) 具有明显的增长，且增加面积不断扩大，与混交林逐年的增长相吻合，由此说明混交林是引起叶面积指 LAI 变化的主要土地利用类型。

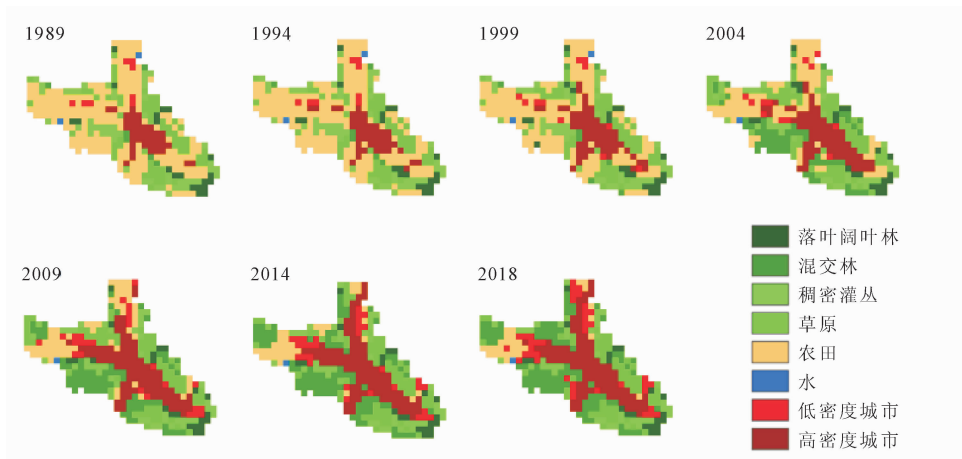


图 2 1989 年—2018 年西宁市土地利用类型分布图

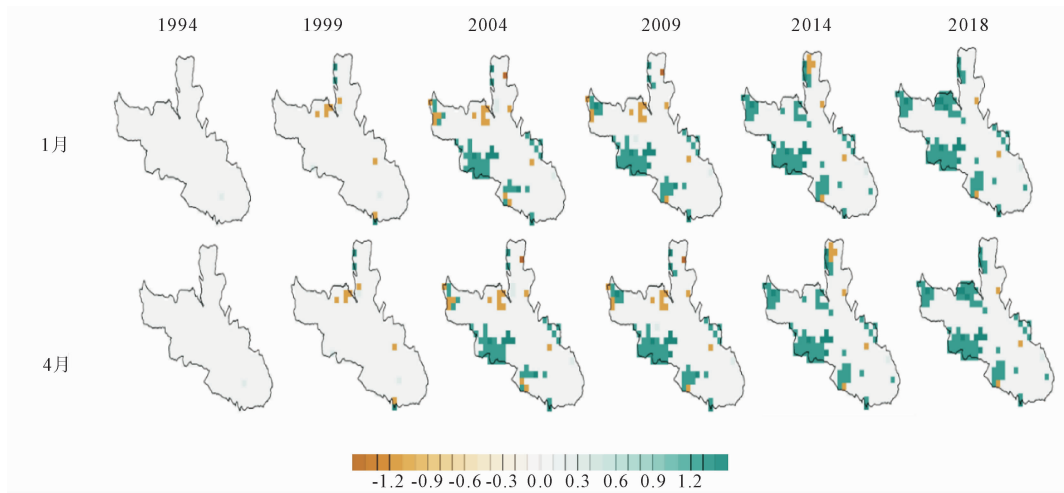


图 3 西宁市叶面积指数变化 (单位: m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

3.2 模型验证

WRF 模式对青海省西宁市的近地 2 m 气温、地表温度以及降水的模拟具有较好的模拟精度，如图 4 所示。模拟得到的 1994 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2018 年 1 月、4 月、7 月和 10 月的近地 2 m 气温与站点观测数据对比，决定系数可达 0.96，见图 4(a)，地表温度的模拟结果与站点观

测决定系数约为 0.98，见图 4(b)，降水的模拟结果与站点观测决定系数约为 0.81，见图 4(c)，说明 WRF 模式的模拟结果真实有效，模式的参数化方案和物理过程在青海省西宁市具有一定代表性。综上所述，WRF 模式能够较好的模拟青海省西宁市的气候变化，数值试验结果可以表明 WRF 模式可以用于土地利用变化对青海省西宁市气候影响的模拟研究。

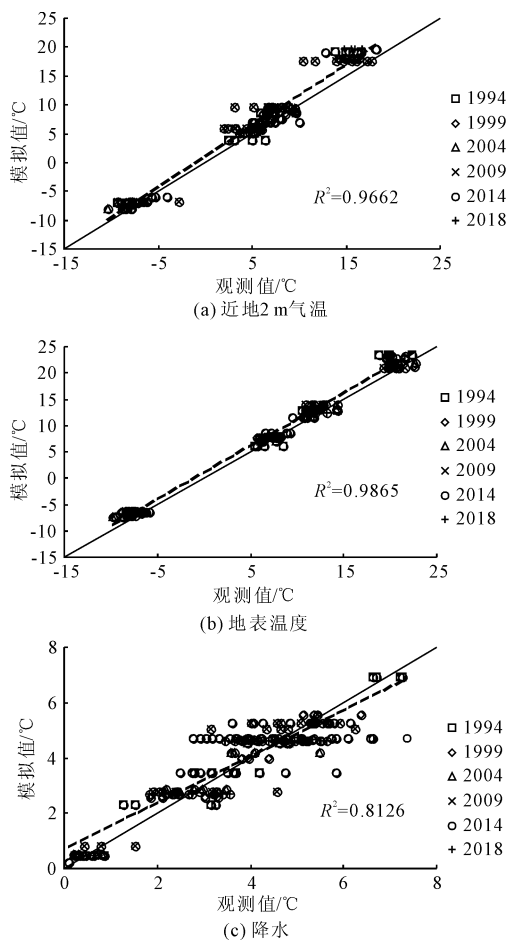


图 4 1994 年—2018 年西宁市温度及降水的模拟值与观测值

3.3 地表温度

地表温度是由于来自太阳的热能被辐射到地面后,一部分被地面吸收使地面增热。对于西宁市的地表温度,见图 5,1994 年—2018 年降温面积在不断增加,降温幅度也有所增强,最高降温可达 1℃。在降温区域上,主要集中在西宁市的西南与北部区

域,与叶面积指数 LAI 的区域变化较为一致,说明植被覆盖度对地表温度具有重要影响。此外,地表温度的变化主要集中在  $-1^{\circ}\text{C} \sim -0.2^{\circ}\text{C}$  之间,其中,在西宁市中部的城市集中区域降温效果不显著。

对于绿化区域全天地表温度而言,在 1994 年、1999 年、2004 年、2009 年、2014 年和 2018 年这 6 个年份中,“绿化工程”引起的土地利用变化对绿化区域的全天地表温度具有显著的降低作用,如图 6 所示,地表温度变化最高可达  $1^{\circ}\text{C}$ ,平均降温约为  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。在季节上看,“绿化工程”引起的土地利用变化的降温效果具有季节性差异,其中,春季(4 月)的降温效果最为显著,降温区间为  $-1.2^{\circ}\text{C} \sim -0.6^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 近地 2 m 气温

气温是大气环境与太阳辐射共同作用的结果,易受下垫面影响。“绿化工程”引起的土地利用变化在绿化区域和西宁市均可以起到一定降低气温的作用,如图 7 所示。在绿化区域 1 月份多年平均日均降温为  $0.06^{\circ}\text{C}$ ,4 月份多年平均日均降温可达  $0.08^{\circ}\text{C}$ ,7 月份约为  $0.05^{\circ}\text{C}$ ,而在 10 月份只有约  $0.01^{\circ}\text{C}$ ;相对于绿化区域,西宁市的降温效果更差,在 1 月份、4 月份的多年平均日均降温分别为  $0.01^{\circ}\text{C}$  和  $0.02^{\circ}\text{C}$ ,且在 7 月份和 10 月份多年平均降温变化则不足  $0.01^{\circ}\text{C}$ ;近地 2 m 气温在季节上呈现冬季(1 月)和春季(4 月)降温效果显著的特征,在西宁市最高降温为 2014 年 4 月的  $0.04^{\circ}\text{C}$ ,在绿化区域最高降温为 2014 年 4 月的  $0.14^{\circ}\text{C}$ ;且冬季(1 月)和春季(4 月)气温的变化幅度与模拟时间具有一定的关联性,绿化区域的冬季(1 月)和春季(4 月)气温变化最大的时间均为 2014 年,变化幅度均约为  $0.14^{\circ}\text{C}$ ;而西宁市变化最大的也为 2014 年,变化幅度分别约为  $0.03^{\circ}\text{C}$  和  $0.04^{\circ}\text{C}$ 。

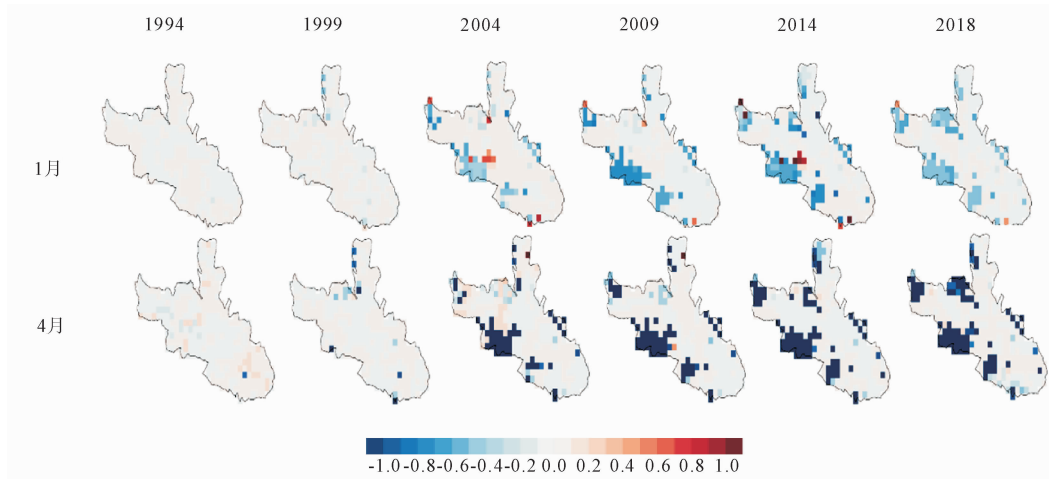


图 5 1994 年—2018 年西宁市地表温度变化(单位:℃)

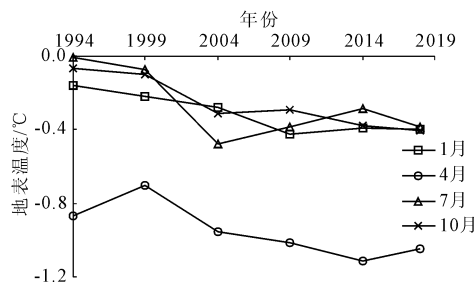


图6 绿化区域地表温度变化

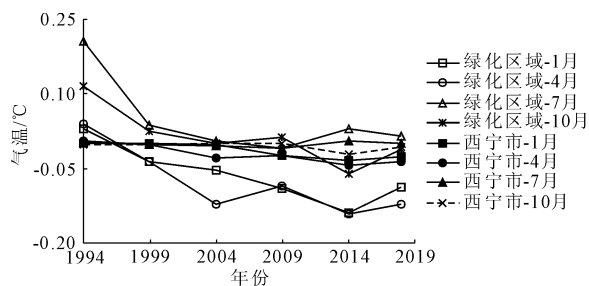


图7 近地 2 m 气温变化

### 3.5 风速

风是气候的重要参与者,对区域能量与水分循环和转换起着至关重要的作用。“绿化工程”引起的土地利用变化具有降低风速的作用,见图 8 所示。随着西宁市“绿化工程”实施后植被变高,导致了地表粗糙度的增加,对水平风起阻挡作用,绿化区域 1 月、4 月、7 月和 10 月的多年平均风速降低量分别为 0.20 m/s、0.36 m/s、0.30 m/s 和 0.21 m/s,风速最大变化量为 0.56 m/s,最小变化量为 0.12 m/s;西宁市 1 月、4 月、7 月和 10 月的多年平均风速降低量分别为 0.05 m/s、0.08 m/s、0.08 m/s 和 0.05 m/s,风速最大变化量为 0.14 m/s,最小变化量为 0.003 m/s。此外,绿化区域的风速变化约是西宁市的 4 倍,由此说明植被覆盖度对风速变化具有重要影响。

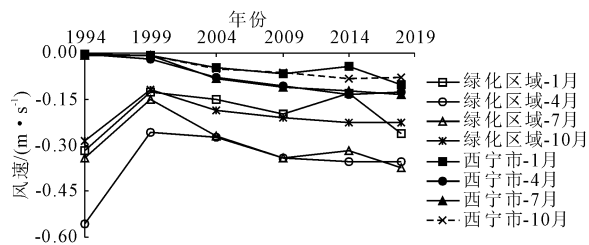


图8 风速变化

## 4 结论

(1) 自 1989 年实施“绿化工程”,西宁市土地利用类型-农田和混交林变化最大。1989 年西宁市

最大的土地利用类型为农田和草地,占比分别约为 53.8 % 和 15 %,到 2018 年混交林是面积增加最多的土地利用类型,其占比增加了 23.9 %。

(2) 基于真实下垫面情况构建的 WRF 模式可以较好地描述气候变化的实际情况,对西宁市的气候变化模拟具有较高的模拟精度。

(3) 土地利用变化对模拟期(1994—2018 年)的地表温度、近地 2 m 气温、风速具有较为显著的影响。地表温度的降温效果在冬季(1 月)和春季(4 月)最为显著,降温区域主要集中在西宁市的西南与北部区域。土地利用变化在绿化区域和西宁市均具有一定程度的降低气温效果,同时近地 2 m 气温在季节上呈现冬季(1 月)和春季(4 月)效果更加明显的特征。土地利用变化对风速具有极大的降低作用,且在绿化区域的降低作用更显著。

### 参考文献:

- [1] 史永亮,王如松,周海波,等. 南疆生态脆弱区土地利用变化及其生态影响评价——以新疆阿克苏市为例[J]. 生态学杂志,2006(7):753-758.
- [2] 谢志清,王 佟,万余庆,等. 遥感技术在西北生态脆弱区生态地质勘查中的应用研究[J]. 中国煤炭地质,2020,32(2):34-38.
- [3] 鄯继尧,赵 媛. 近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望[J]. 南京师大学报(自然科学版),2020,43(4):1-12.
- [4] 何 聪,姜 峰,王锦涛. 从 7.2% 到 75%—西宁坚持植绿高原改善生态的实践(上)[J]. 青海党的生活,2017(9):30-31.
- [5] Newbold T, Oppenheimer P, Etard A, et al. Tropical and mediterranean biodiversity is disproportionately sensitive to land-use and climate change [J]. Nature Ecology & Evolution, 2020,4(12):1630-1638.
- [6] Seneviratne S I, Phipps S J, Pitman A J, et al. Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation [J]. Nature Geoscience, 2018,11(2):88-96.
- [7] 陈昊荣,金 生. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):245-250.
- [8] Science ICF. International Council for Science (ICSU) [C]. International Council for Science, 2014.
- [9] Zhao B, Kreuter U, Li B, et al. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China [J]. Land Use Policy, 2004,21(2):139-148.
- [10] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, et al. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net

- primary productivity [J]. *Nature Communications*, 2019,10: 5558.
- [11] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001,292:2320-2322.
- [12] Kumar S, Dirmeyer P A, Merwade V, et al. Land use/cover change impacts in CMIP5 climate simulations: A new methodology and 21st century challenges [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118 (12):6337-6353.
- [13] Wu C Y, Chen B W, Huang X J, et al. Effect of land-use change and optimization on the ecosystem service values of Jiangsu province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:106507.
- [14] Halder S, Saha S K, Dirmeyer P A, et al. Investigating the impact of land-use land-cover change on Indian summer monsoon daily rainfall and temperature during 1951—2005 using a regional climate model [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2016,20 (5):6575-6633.
- [15] Wang J, Huang B, Fu D J, et al. Response of urban heat island to future urban expansion over the Beijing—Tianjin—Hebei metropolitan area [J]. *Applied Geography*, 2016,70:26-36.
- [16] Wang H, Pitman A J, Zhao M, et al. The impact of land-cover modification on the June meteorology of China since 1700 simulated using a regional climate model [J]. *International Journal of Climatology*, 2003,23 (5):511-527.
- [17] 辛秋玲,李忠亮,郭强. 西宁市1986—2005年气候特征分析[J]. *河南农业*,2017(14):44-46.
- [18] Bryan B A, Nolan M, Mckellar L. Land-use and sustainability under intersecting global change and domestic policy scenarios: Trajectories for Australia to 2050 [J]. *Global Environmental Change*, 2016,38:130-152.
- [19] 王晓君,马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. *地球科学进展*,2011,26(11):1191-1199.
- [20] 白文娟,白文蓉,陈晶,等. 西宁市人居环境气候舒适度评价[J]. *青海环境*, 2020,30(1):34-39.
- [21] 常周梅,胡文博,张丽娟. 西宁市1951—2015年气温及降水量变化特征[J]. *水电能源科学*,2017,35(2):7-11.
- [22] 朱宝文,张令振,谢启玉,等. 1954—2016年西宁市区气温变化特征[J]. *气象水文海洋仪器*,2021,38(4):117-120.
- [23] 李京梅,盛嘉誉,唐仲涛. 近60年西宁地区气候变化及突变分析[J]. *青海科技*,2021,28(5):100-106.
- [24] 赵娟,谢启玉. 西宁地区一次副高边缘型暴雨天气过程分析[J]. *农业灾害研究*,2021,11(1):55-58.
- [25] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the national centers for environmental prediction operational mesoscale Eta model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003,108(D22):8851.
- [26] 刘振鑫. 应用城市冠层模式与WRF模式耦合研究城市化效应[D]. 北京:北京大学,2014.
- [27] Zeng X M, Wu Z H, Xiong S Y, et al. Sensitivity of simulated short-range high-temperature weather to land surface schemes by WRF [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011,54(4):581.
- [28] 郑颖. 基于数值模拟的毛乌素沙地植被变化对区域气候和水分平衡影响研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2021.
- [29] Mahrt L, Ek M. The influence of atmospheric stability on potential evaporation[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*,1984,23(2):222-234.
- [30] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007,50(3):885-900.