

DOI: 10.5846/stxb201709021586

王瑾杰, 丁建丽, 张喆. 2008—2014 年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Wang J J, Ding J L, Zhang Z. Temporal-spatial dynamic change characteristics of soil moisture in Ebinur Lake Basin from 2008—2014. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

## 2008—2014 年新疆艾比湖流域土壤水分时空分布特征

王瑾杰<sup>1,2,3</sup>, 丁建丽<sup>1,2,3,\*</sup>, 张 喆<sup>2,3</sup>

1 新疆大学 生态学科博士后科研流动站, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学 资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学 资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

**摘要:**传统的土壤水分模拟研究难以从土壤水分变化的时空双向出发表达其连续演变的过程, 存在时空尺度效应问题。借助 SWAT 模型模拟的长时间序列优势, 结合高分辨率卫星影像和遥感技术, 力图在时空尺度效应问题上取得突破。并利用长时间序列的模拟结果分析流域土壤水分的空间格局和不同维度时空异质性。结果表明: (1) 2008—2014 年间艾比湖流域土壤水分主要受气温、降水及人类活动影响, 呈波动变化, 总体偏低且具有逐年减小趋势。(2) 受降水、地形及土地覆被影响, 土壤水分分布呈现出由山区向两侧平原减少的特点, 且林地>农用地>草地>稀疏植被。(3) 近 10 年间土壤水分低值区由原来的北部山区及平原向东部、东南部平原区及南部山区迁移, 东部减少最为明显。(4) 流域四季土壤水分变化差异显著。其中, 春季主要受融雪影响; 夏季、秋季主要受降雨量和气温影响; 冬季主要受固态降雪和气温影响; 且不同年份、相同季节、相同子流域土壤水分变化趋势表现一致。

**关键词:**土壤水分; SWAT 模型; 趋势分析; 艾比湖流域

## Temporal-spatial dynamic change characteristics of soil moisture in Ebinur Lake Basin from 2008—2014

WANG Jinjie<sup>1, 2, 3</sup>, DING Jianli<sup>1, 2, 3, \*</sup>, ZHANG Zhe<sup>2, 3</sup>

1 Ecological postdoctoral research station, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Xinjiang Common University Key Lab of Smart City and Environmental Stimulation and College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

**Abstract:** It is difficult to express the true soil moisture temporal and spatial variation in traditional methods, because it always reflects a certain spatial resolution or discrete temporal pattern, which is not a continuous process. In this paper, we use SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model and multi-source remote sensing data to solve the problems caused by the effects of spatial and temporal scales of soil moisture monitoring. Explore the scientific regional scale and long-time-series soil moisture simulation method, and use the simulation results analysis soil moisture in different time and space in study area. The results showed the following: (1) soil moisture over the entire region was continued decline from 2008—2014. The major factors affecting this trend are temperature, precipitation, and human activities. (2) The distribution of soil moisture is affected by precipitation, temperature, and land cover. The distribution of soil moisture is characterized by decreasing from the mountainous area to the plains, and in the following order: woodland > agricultural land > grassland > sparse vegetation. (3) In the past 10 years, the area with low soil moisture shifted from the northern mountainous plains to

基金项目: 自治区青年基金(2018D01C067)

收稿日期: 2017-09-02; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

the eastern part, southeastern plains, and southern mountains, one of the most obvious change was eastern part. (4) The variation in soil moisture in the four seasons was significant. Soil moisture in spring and autumn were affected by rainfall and temperature, and that in winter was affected by the snow melt and temperature. The sub-basin soil moisture change were consistent in same season in different years.

**Key Words:** soil moisture; SWAT model; trend analysis; Ebinur Lake Basin

土壤水分是陆地生态系统物质运动与大气能量交换的关键要素<sup>[1]</sup>,对气候变化及生态、水文过程有重要的调节作用<sup>[2]</sup>。目前全球气候变化改变了陆面水循环要素和土壤水分<sup>[3]</sup>,对以水定人、以水定地的干旱区而言,长时间序列、区域尺度的土壤水分监测对区域生态安全、旱情预报、农业生产以及水资源管理等领域有重要意义<sup>[4]</sup>。

艾比湖流域具有典型的干旱区生态环境特征,近年来由干旱引发的湖泊面积萎缩,使湖滨周边干涸湖底大面积裸露且严重盐碱化,受常年大风影响,艾比湖目前已成为继咸海之后全球第二大盐尘暴、沙城暴发源地,干旱化不断加剧。土壤水分作为流域干旱的重要指示性因子,其时空分布及变化受到诸多学者的关注。杨建军<sup>[5]</sup>等利用传统站点测量方法对艾比湖流域鸭子湾、东大桥、桑德库木、桦树林等四个站点土壤水分、土壤温度等要素进行长期监测分析,结果显示该区域土壤水分变化主要受气温、降水及蒸散影响。秦璐<sup>[6]</sup>等分析艾比湖流域 16 个典型群落的土壤水分,结果显示流域内阿齐克苏河河谷土壤水分空间分布西部较东部干旱。张威海<sup>[7]</sup>、张雅丽<sup>[8]</sup>等利用传统野外土壤水分实测数据分析艾比湖流域土壤水分空间异质性,结果表明,除气候条件外,地形地貌、水文地质和人类活动是影响艾比湖流域土壤水分空间异质性的重要因素。朱小强<sup>[9]</sup>等利用 MODIS 影像结合 TVDI 指数反演艾比湖流域 2013、2014、2015 年的 5 月、10 月土壤水分,并以实测数据予以验证。

综上所述研究发现,目前针对艾比湖流域土壤水分的研究主要受时空尺度制约,缺乏流域尺度、连续的时空变异性研究,难以全面反映流域特殊的“山地-绿洲-荒漠”系统土壤水分变化特征。基于此,本研究将 SWAT 模型与 RS、GIS 技术相结合模拟土壤水分,利用 GF-1 号卫星反演区域土壤剖面电导率修正 SWAT 模型土壤参数,进一步提高 SWAT 模型模拟地表分量精度,并对其模拟的 2008—2014 年流域尺度、长时间序列土壤水分时空变化及分布特征进行分析,为流域土壤水分数据重建、旱情监测及预报等工作提供基础数据支撑。

## 1 研究区概况

艾比湖流域位于 43°38′—45°52′N 和 79°53′—85°02′E 之间(图 1),深居大陆腹地,自然条件恶劣,受三面环山阻隔外界气流的影响,流域内气候变化剧烈且十分干燥,降雨量稀少、日照充足,蒸发量大,流域水资源与生态系统对气候变化响应十分敏感。流域内有内陆干旱区典型的封闭型湖泊及新疆第一大盐水——艾比湖,从 20 世纪 50 年代初至今,湖泊面积从 1200 km<sup>2</sup>萎缩至 500 km<sup>2</sup>左右,蓄水量由 30 多亿 m<sup>3</sup>减少到 7 亿 m<sup>3</sup>左右,湖滨荒漠林减少 62%,湖中芦苇面积减少 94%,湖滨周边干涸湖底大面积裸露且严重盐碱化,受常年大风影响,已使艾比湖成为继咸海之后全球第二大盐尘暴、沙城暴发源地。流域干旱化趋势十分明显,已对天山北坡农牧业发达的绿洲内生态安全和可持续发展造成严重影响。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

文章研究思路如图 2 所示,研究过程所涉及的数据介绍如下:①高程数据采用 ASTER GDEM 制作,空间分辨率 30 m;②土地覆盖数据来源于 2010 年中科院国家科技支撑计划,利用多时相 Landsat TM/ETM 遥感影像目视解译生成;③气象数据来自中国水科院发布的中国大气同化驱动集(The China Meteorological

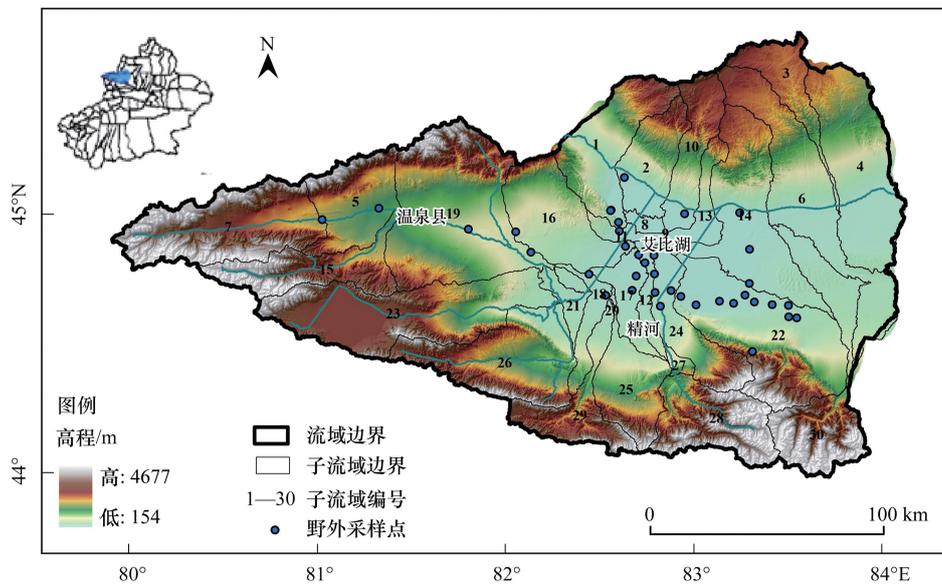


图 1 艾比湖流域边界示意图

Fig.1 Boundary figure of Ebinur Lake Basin

Assimilation driving Datasets for the SWAT model, CMADS), 空间分辨率  $1/3^\circ$ , 时间尺度为 2008 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日。所有站点提供了日平均温度、日最低\高温度、日累计 24 时降水量、日平均太阳辐射、日平均气压、日相对湿度、日比湿度、日平均风速数据;④土壤数据采用世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSO) 1:100 万土壤数据, grid 栅格格式, WGS84 投影, FAO-90 土壤分类系统, 美制土壤粒径分级标准;⑤径流数据来自博尔塔拉蒙古自治州温泉、精河水文观测站, 日径流数据为 2009 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日日、月尺度数据。对 SWAT 模拟径流结果进行验证;⑥归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 采用 MODIS 传感器陆地 3 级标准数据, 8 天合成的 MOD13A3 产品, 栅格数据, 空间分辨率 250m, 时间序列为 2008 年 1 月—2014 年 12 月, 共 252 期。下载后通过 ArcGIS10.0 进行缩放、拼接、裁剪, 完成季度、年度数据合成, 用于验证长时间序列 SWAT 模拟土壤水分变化趋势。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 SWAT 模型

研究采用 SWAT 模型模拟土壤水分, 是目前全球应用最广泛的水文模型之一<sup>[10]</sup>。美国、印度、德国等学者对该模型在不同时空尺度上的适用性和有效性进行了验证<sup>[11-14]</sup>。考虑 SWAT 模型是基于湿润地区下垫面状况研发, 国内学者用于干旱区地表分量模拟时对其进行了参数修正及模型算法改进等研究, 都取得了良好的效果<sup>[15-16]</sup>。该模型由美国农业部农业研究局开发, 主要包括气候、土壤类型、农业管理以及土地利用方式等多种参数, 可模拟地表径流、土壤水分、氮、磷、泥沙等地表分量<sup>[17]</sup>。其中, 土壤水分可以被植被吸收或蒸发, 也可从土壤剖面底渗漏并最终变为含水层出流, 还可在土壤剖面中作水平运动补给河道径流, 过程复杂<sup>[18]</sup>。SWAT 模拟土壤水分时充分考虑上述过程, 以明确的物理机制实现土壤水分的定量计算<sup>[19]</sup>。

### 2.2.2 分类回归树法

本文基于土壤盐渍化发生机理, 在刘广明等人<sup>[20]</sup>提出的分类回归树法反演区域土壤剖面电导率算法基础上, 以 GF-1 卫星 16 m 高分辨率遥感影像的多波段组合计算的土壤指数、植被指数、盐分系数及饱和度作为自变量, 将野外采样得到的各层土壤电导率作为因变量, 按不同土层输入分类回归树 (Classification and Regression Tree, CART) 软件建模, 建立基于分类回归统计规则的线性模型, 具体通过 Cubist2.08 数据挖掘软件实现。再将线性模型和自变量图像输入 ENVI (The Environment for Visualizing Images, ENVI) 软件进行计算, 输出各层土壤电导率空间分布图, 最终获取 0—100 cm 艾比湖流域土壤剖面电导率空间数据, 用以代替修

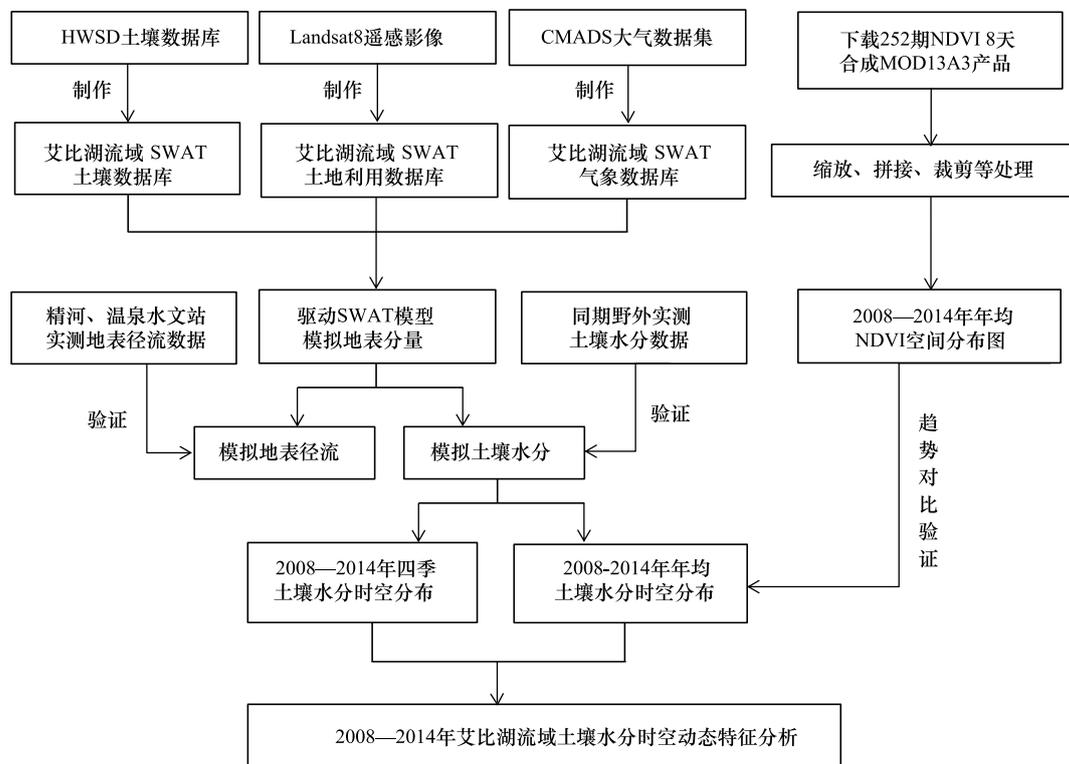


图2 研究思路

Fig.2 Research technical route

正 SWAT 土壤数据库参数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 构建艾比湖流域 SWAT 模型数据库

驱动 SWAT 模型除数字高程 (Digital Elevation Model, DEM) 数据外,需制作土地利用数据库、土壤数据库和气象数据库为子流域和水文响应单元的划分提供空间物理依据。首先,利用 4 幅 ASTER GDEM 30 m 分辨率 DEM 数据,将艾比湖流域划分为 30 个子流域,如图 3a 所示。其次,选用由中科院提供的 2010 年全国陆地区域 1:10 万比例尺土地利用现状遥感监测数据建立艾比湖流域 SWAT 模型土地利用数据库。其中,需将原土地利用分类转换为 SWAT 模型土地利用分类标准。转换后各地类分别占流域总面积比例为:林地 (FRST, 5.20%), 牧场 (PAST, 28.82%), 细芽草 (SWGR, 15.16%), 水域 (WATR, 3.81%), 冰川及永久性积雪 (CNJX, 1.17%), 中低密度居民区 (URLD, 0.28%), 荒地 (BALD, 35.47%), 混合湿地 (WETL, 0.25%), 荒漠 (HTHM, 2.85%), 中耕作物 (AGRR, 6.98%), 空间分布如图 3b 所示。SWAT 模型对土壤数据库有严格且复杂的要求,本文依据 HWSD 土壤数据库将艾比湖流域土壤质地划分为 39 种类型参与土壤水分的计算,具体划分结果如图 3c 所示。

文章采用 CMADS 大气同化气象数据集 (V1.0) 制作艾比湖流域 SWAT 模型气象数据库,时间跨度为 2008 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日的日尺度数据,利用 ArcGIS 加载艾比湖流域边界,共遴选出隶属艾比湖流域边界内的 45 个站点,数据包括降水、太阳辐射、温度、压强、相对湿度、风速等六大要素。

将上述 DEM、土地利用、土壤质地及气候数据通过索引表分别写入 SWAT 模型数据库,运行 SWAT 模型模拟结果如下。

#### 3.2 艾比湖流域土壤水分模拟

利用 ArcGIS 10.0 将 2008—2014 年 SWAT 模型模拟的艾比湖流域土壤水分数据,并将 30 个子流域数字

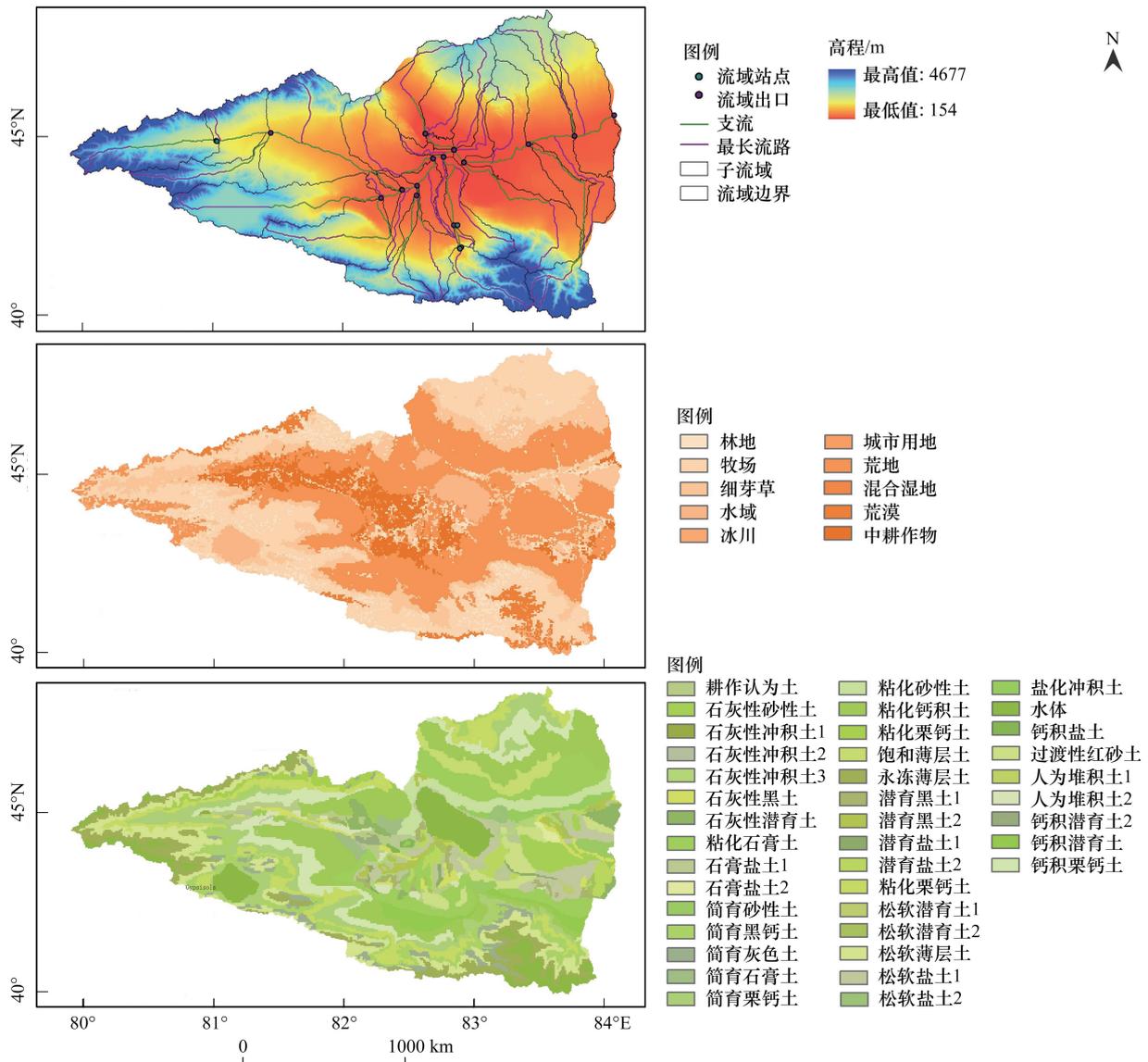


图3 艾比湖流域 SWAT 模型数据库空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of SWAT database in the Ebinur Lake Watershed

a.子流域空间分布图; b.土地利用分类数据; c.土壤质地类型数据

格式转化为空间格式数据,如图4所示。

### 3.3 精度验证

为确保土壤水分模拟精度,以输出分辨率最高的径流模拟结果为标准进行精度检验,再通过 SWAT-CUP 进行敏感性分析及参数调整,径流量模拟结果达到最优后提取土壤水分模拟结果进行时空变化分析。

#### 3.3.1 径流模拟精度验证

选取纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)和决定性系数(Coefficient of determination,  $R^2$ )对径流量模拟结果进行评估<sup>[21]</sup>。其中,Nash 系数以 Moriasi 的 SWAT 月径流模拟结果  $NSE \geq 0.6$ ,日径流模拟结果  $NSE > 0.5$  为评价标准;决定系数  $R^2$ 越接近 1,表明模拟值越接近观测值。

利用精河、温泉水文站实测数据对模拟结果进行验证,模拟评估结果见表1。表中参数率定期为 2009—2010 年,模型验证期为 2011—2013 年。

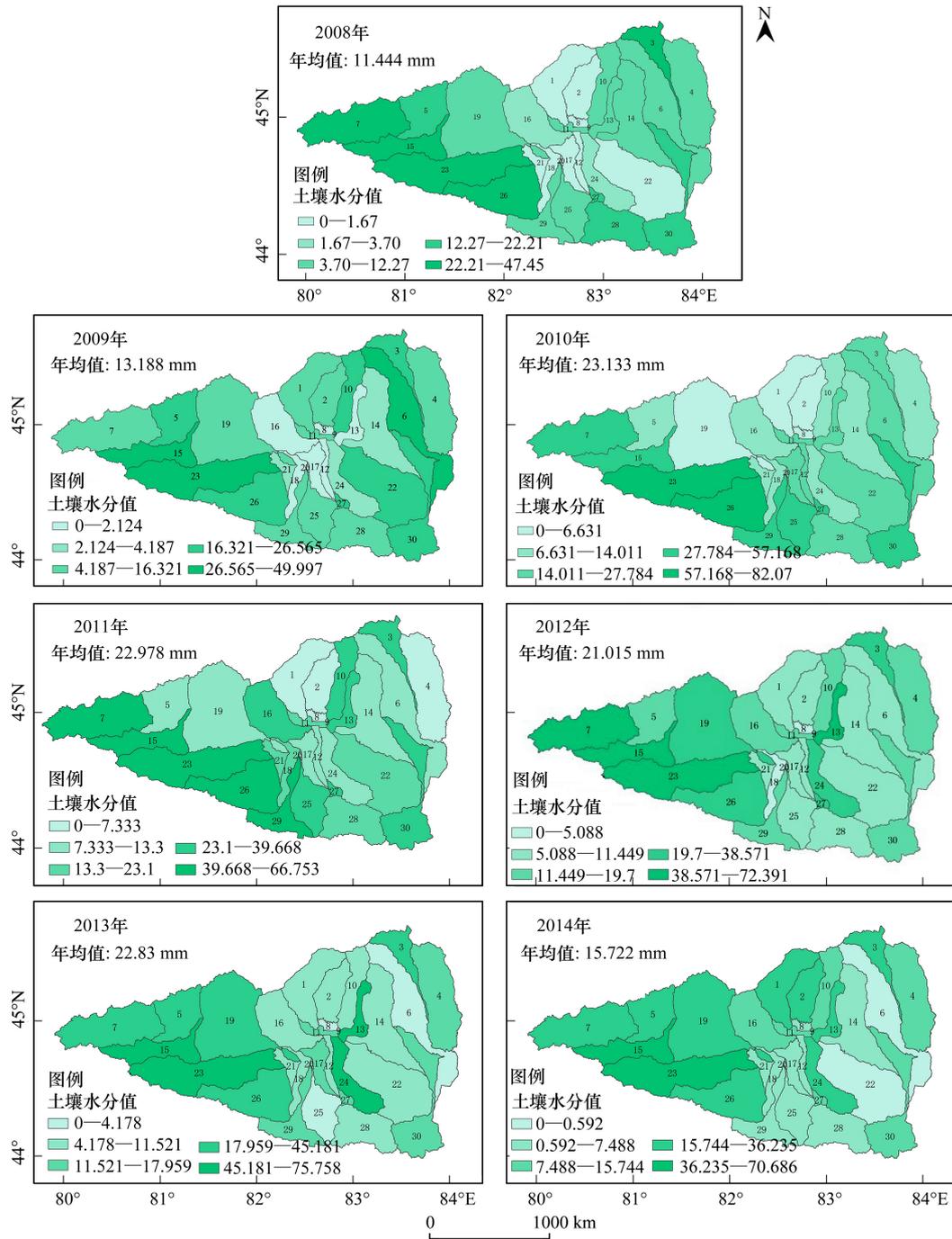


图4 艾比湖流域 2008—2014 年土壤水分时空分布图

Fig.4 Temporal and spatial distribution of soil moisture in the Ebinur Lake Basin from 2008—2014.

表 1 SWAT 模拟艾比湖流域径流输出日、月拟合结果评估

Table 1 The assessment under monthly and daily scale simulated by SWAT model

	精河山口控制站				温泉控制站			
	率定期 纳什系数 Calibration NSE	率定期 决定系数 Calibration $R^2$	验证期 纳什系数 Validation NSE	验证期 决定系数 Validation $R^2$	率定期 纳什系数 Calibration NSE	率定期 决定系数 Calibration $R^2$	验证期 纳什系数 Validation NSE	验证期 决定系数 Validation $R^2$
月 Month	0.739	0.742	0.704	0.734	0.617	0.714	0.609	0.644
日 Day	0.691	0.615	0.602	0.651	0.596	0.593	0.506	0.508

分析表 1 模拟结果,精河山口水文站模拟结果精度均高于温泉水文站,且月模拟精度高于日模拟精度,总体符合精度检验标准,模拟结果在可利用范围,下一步提取土壤水分模拟结果。

### 3.3.2 土壤水分模拟精度验证

#### (1) 实测数据精度验证

通过上述径流模拟结果检验及敏感性调参,我们得到 2008 年 3 月 1 日—2014 年 12 月 31 日土壤水分数据集。为确保模拟精度,采用 2014 年 5 月 17 日—21 日间的 38 个野外实测土壤水分数据对模拟结果进行验证,采集时间及采样点坐标如图 1 所示。

选取相关系数  $R^2$  进行精度检验,取值范围为 0—1,  $R^2$  越接近 1,则说明二者变化趋势越趋近于一致。38 个野外采样点实测值与模拟值  $R^2$  为 0.1606。分析数据发现,38 个采样点中有 5 组异常数据超出土壤水分正常值范围,是导致模拟结果精度较低的主要原因。为减少野外数据采集和模型参数产生的误差,对数据进行筛选,选取在合理范围内的土壤水分数据 33 组重新计算模拟精度,  $R^2$  为 0.5602 (图 5)。综合比较国内外土壤水分模拟研究结果<sup>[22]</sup>,精度可靠。虽然精度还有待进一步提高,但该模拟结果在众多模拟研究中具有明显的时间序列优势,可为长时空土壤水分变化研究提供有效途径。

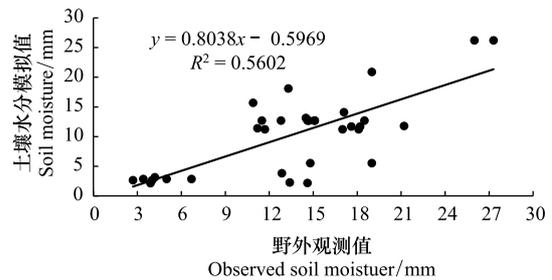


图 5 土壤含水量实测值与 SWAT 模拟结果相关分析

Fig.5 Correlation analysis between measured soil moisture and SWAT simulation

#### (2) 遥感数据精度验证

为进一步确保长时间序列土壤水分模拟结果的可靠性,文章采用与土壤水分密切相关的植被指数 NDVI 对土壤水分模拟结果的变化趋势进行检验。选取 MODIS 传感器 2008 年 1 月—2014 年 12 月 8d 合成 1 km 分辨率 NDVI 三级陆地产品 252 期数据进行下载、缩放、裁剪、拼接、计算,得到与土壤水分时间和空间尺度相匹配的 NDVI 年尺度空间分布图,图 6 列举了土壤水分变化剧烈的 2008 和 2014 年的 NDVI 空间分布图。

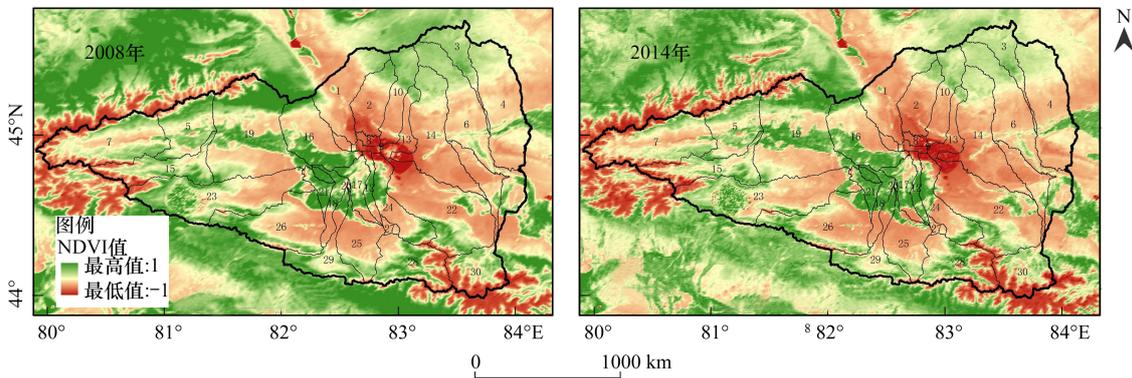


图 6 艾比湖流域 2008 年和 2014 年 NDVI 时空分布图

Fig.6 Temporal and spatial distribution of NDVI in the Ebinur Lake Basin from 2008 and 2014

图中绿色区域代表 NDVI 高值区,绿色越深代表植被长势越好或覆盖度越高;红色区域代表 NDVI 低值区,红色越深代表植被覆盖差或无植被覆盖。以线性变化趋势图将 2008—2014 年年均土壤水分和归一化植被指数 NDVI 进行比较,如图 7 所示。

2008—2014 年间,NDVI 整体上与流域土壤水分具有相同变化趋势。该结果进一步证实,本文通过 SWAT 模型模拟的 2008—2014 年艾比湖流域年均土壤水分变化趋势结果可靠。

### 3.4 土壤水分的时空变化

#### 3.4.1 年均土壤水分时空分布特征

由图 4 可知,2008—2014 年艾比湖流域年平均土壤水分表现为明显的时空异质性;其中,低值区为 2008—2009 年;2010 年呈明显上升趋势;2011—2014 年缓慢减少;2014 年较 2010 年减少 32.03%。将 2008—2014 年年均土壤水分以阈值进行划分,低于 15 mm 的年份为 2008 年、2009 年占总年份的 28.6%;15—20 mm 之间的年份为 2014 年占总年份的 14.2%;高于 20 mm 的年份为 2010 年、2011 年、2012 年、2013 年占总年份的 57.1%。虽 2010—2013 年年土壤水分高于 20 mm,但流域整体干旱化趋势并未减轻。因此,从气候变化和人类活动两方面分析影响流域干旱化的主导因素。

2008 年艾比湖流域年降水量 189 mm,年平均气温为 4.9℃,相对其他年份有降水量少、气温高的特点,此时年平均土壤水分 11.44 mm,为 2008—2014 年间最低值;2010 年区域降水量(215.3 mm)明显增加,气温保持平稳,流域年平均土壤水分 23.13 mm 呈明显上升趋势。由此可知,2008—2010 年,气候要素,尤其降水和气温是艾比湖流域土壤水分剧烈变化的主要影响因素。

2011 年年平均气温 4.6℃,年降水量 343.9 mm,年平均土壤含水量 22.97 mm;与 2010 年相比,年均气温降低 0.1℃,降水量增加 128.6 mm;土壤含水量却减少 0.16 mm。说明在气温降低且降水量增加 59.7% 的背景下,流域土壤含水量却呈现减少趋势。且 2011—2014 年流域年均气温及降水量变化不明显的情况下,年均土壤水分持续下降。说明从 2011 年起,还有其他因素和气候要素共同影响区域土壤水分。查阅艾比湖流域 2011 年发展规划资料发现,2011 年艾比湖流域新增耕地 3.4 万亩、新建维修改造防渗渠道 30.03 km;新修防洪坝 4.2 km;实施饮水安全工程 4 处,解决了全市 2.1 万人的安全饮水问题;有效开展节水型社会建设试点 3 个;新增名特优水产品养殖 3 户;实施各类水利项目 15 个;各类水库蓄水和大面积开荒灌溉措施将会对后期流域整体的干旱化带来巨大影响,而类似的工程在 2012—2014 年还将持续新增,进一步说明 2010—2014 年期间流域整体土壤水分的减少与人类活动密不可分。

分析流域土壤水分空间变化,艾比湖流域年土壤水分均值总体偏低,且低值区由原来的北部山区及平原区的 5、19、16、1、2、8 号子流域逐渐向东部平原区、东南部平原区及南部山区的 17、12、24、29、25、28 号子流域迁移,截止到 2014 年土壤水分减少最明显的区域主要集中在流域东部;西部及西南部也有不同程度降低;海拔较高的山区地带 7、15、23、26 号子流域土壤水分范围从 2010 年的 27.78—82.07 mm 变化到 2014 年的 15.7—70.68 mm,呈明显减少趋势。造成这种格局变化主要有三方面原因:①流域近 15 年来虽受西风环流影响,带来大西洋的湿润气流,在山地迎风坡形成丰富的降水,使平原区降水量相对较少;加之流域深居内陆、降水量总体偏少、蒸发量大、常年大风,使土壤水分低值区面积逐年扩大。②土地覆被亦影响土壤水分的时空格局。从图 4 可以看出,土壤水分的高值区主要分布在西部山区的林地和草地。低值区主要在艾比湖周边及东部山区的草地和稀疏植被区。同时,受人为灌溉的影响,绿洲区农用地的土壤水分值高于绿洲边缘植被稀疏区。为进一步分析不同土地覆被类型的土壤水分变化特征,统计研究区典型的 4 种土地覆盖年均土壤水分变化,发现 2008 年和 2014 年土地覆被类型的土壤水分状况均为:林地>农用地>草地>稀疏植被,这是由于不同土地覆被的根系对土壤水分的吸收及叶片蒸腾性质存在差异,导致陆地与大气间相互作用的能量重新分配,使土壤水分时空格局表现出显著的时空异质性。③近年来艾比湖流域人类活动频繁,开荒种植、植树造林、兴修水利等措施,势必带来大量水资源的消耗。且博尔塔拉蒙古自治州 2010 年人口 44.36 万,截止 2014 年末人口增加至 49.38 万人,人口数量及城镇面积的扩张,伴随一系列农业、工业及生态用水的增加,给艾比湖流

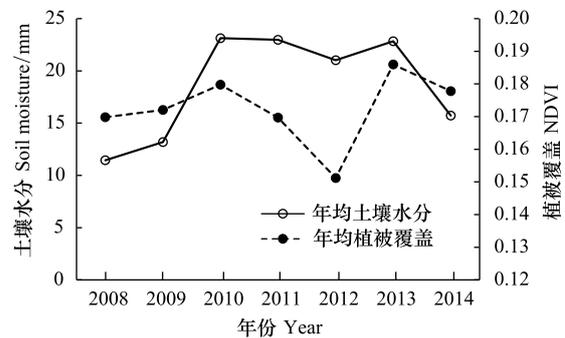


图 7 艾比湖流域 2008—2014 年土壤水分与 NDVI 变化趋势比较  
Fig.7 Compared of soil moisture and NDVI trends in the Ebinur Lake Basin from 2008 to 2014

域地表水和地下水资源总量造成巨大影响。由此可知,艾比湖流域土壤水分低值区的迁移和扩大与气候变化和人类活动密不可分。

### 3.4.2 四季土壤水分时空分布特征

以春、夏、秋、冬为时间节点,选取艾比湖流域土壤水分变化较为典型的 2008 年及 2014 年深入分析季节时空变化特征。其中,以冬季后 5 天平均气温超过 10℃时为春季开始;以春季后 5 天平均温度高于 22℃时为夏季开始;以夏季后 5 天平均温度低于 22℃为秋季开始;以秋季后 5 天平均温度低于 10℃为冬季开始。依此划分将艾比湖流域四季定义为:3 月、4 月、5 月为春季;6 月、7 月、8 月为夏季;9 月、10 月为秋季;11 月、12 月、1 月、2 月为冬季。

首先分析 2008 年艾比湖流域四季土壤水分时空分布情况,如图 8a 所示。

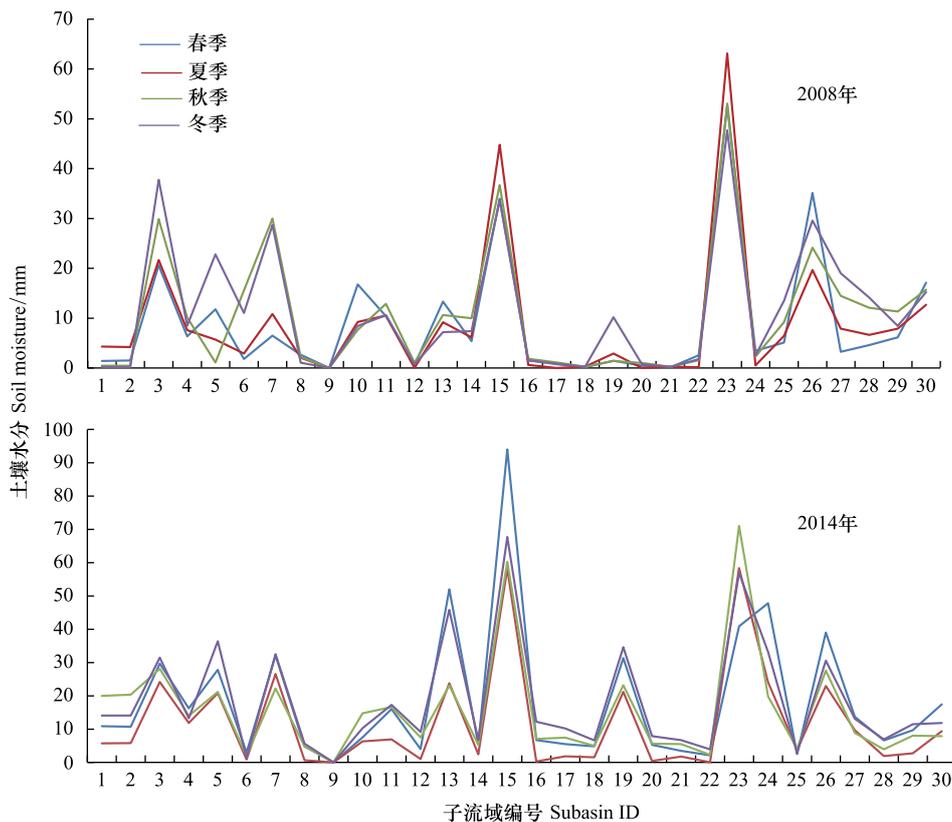


图 8 2008 年和 2014 年艾比湖流域四季土壤水分空间分布

Fig.8 The distribution of soil moisture in the four seasons of Ebinur Lake subasin in 2008,2014

在季节尺度上,2008 年春、夏、秋、冬季平均土壤水分变化范围在 8.92—11.45 mm 之间。其中,冬季和夏季土壤水分较高,春季和秋季土壤水分较低。冬季频繁的固态降水及夏季降雨量的增加是流域冬、夏两季土壤湿度较大的主要原因。

在空间尺度上,3、5、7、10、19、26、28 号子流域不同季节土壤水分变化较大,且 2008—2014 年的四季都表现出较大差异,其余子流域四季变化微弱。从地形角度分析,3、5、7、10、19、26、28 号子流域主要集中在山区及出山口地带,坡度变化明显,降雨形成径流后在重力作用下随坡向以地表径流和壤中流形式汇入河道。此时,土壤持水能力弱,土壤水分高低主要取决于降水量的强度及频率,而山区及出山口地带四季降水量差异明显,因此,这些子流域土壤水分表现出明显的季节性差异。

2014 年研究区 30 个子流域春、夏、秋、冬季土壤含水量空间变化趋势基本一致。土壤含水量分布较高的子流域有 3、5、7、11、13、15、19、23、24、26,较 2008 年增加 3 个流域;增加的 3 个子流域为 13、19、24;从地形角

度分析,13、19号子流域为出山口河道及冲积扇分布地带,2014年年降雨量增加51.5%,因降雨量增加使到达出山口冲积扇地带的径流量增加,是我们发现的2014年5、7号子流域土壤含水量增加的原因之一。此外,在时间尺度上,流域土壤含水量四季变化范围在11.82—18.49 mm之间,且冬季土壤含水量与春、夏、秋季差异相对较小。

综上所述,艾比湖流域2008—2014年间,影响土壤水分变化因素各不同相同,2008、2009和2010年土壤水分变化主要受气温和降水影响;2011—2014年流域土壤水分持续减少,除受气候要素影响外,人类活动也是重要影响因素之一。

#### 4 结论

基于2008—2014年的土壤水分空间模拟数据,研究了艾比湖流域不同时空尺度下土壤水分变化特征,初步分析了土壤水分变化与气候及人类活动的关系,研究取得如下几点结论:

(1)分别利用野外实测土壤水分数据和MOD13A3的NDVI产品对SWAT模型估算的艾比湖流域2008—2014年土壤水分数据进行检验, $R^2$ 为0.4595,与NDVI年变化趋势吻合,说明SWAT模拟土壤水分精度虽有待进一步提高,但长时间序列的土壤水分变化趋势可靠,能满足区域尺度长时间序列的土壤水分空间变化分析的需求。

(2)时间尺度上,2008—2014年艾比湖流域土壤水分值呈波动变化,有总体下降趋势。其中,2008—2009年为低值区,主要受气温和降水量影响;2010年由于降水量的增加导致土壤水分骤增;2011—2014年呈缓慢减少趋势,除受气候要素影响外,人类高强度的水土资源开发活动也是影响土壤水分不断减少的重要因素。

(3)空间格局上,受降水量影响,土壤水分表现为从山区向两侧平原减少的特点。受土地覆盖影响,土壤水分高值区主要分布在流域山区的林地和草地及绿洲农用地,土壤水分低值区主要分布于草地、稀疏植被区及艾比湖湖滨周边区域,土壤水分值总体表现为:林地>农用地>草地>稀疏植被。且土壤水分低值区由北部山区及平原向东部、东南部平原区及南部山区迁移,东部土壤水分减少最明显。造成土壤水分空间格局变化的原因除降水时空分布不均外,还与流域人口增加、城镇扩张、绿洲面积扩大、种植结构变化等人为因素密切相关。

(4)艾比湖流域2008—2014年间土壤水分在春、夏、秋、冬四季存在时空差异。春季土壤水分主要受温度带来的积雪融化影响;夏季、秋季土壤水分主要受降雨量和气温影响;冬季土壤含水量主要受固态降雪和气温影响。因土壤水分受土壤质地、土地覆被、DEM、坡度、季节性降水、气温等要素影响,因此,不同年份、相同季节、相同子流域的土壤水分变化趋势具有相似性。

随着全球及区域气候系统的变化和人类活动干预,水文、土壤等各学科领域都需要区域尺度、长时间序列的高精度土壤水分数据作为研究基础。因此,今后在本研究基础上融合更多地学方法,尽可能均匀增加野外采样点的布设,进一步提高土壤水分模拟精度,建立区域尺度、长时序土壤水分数据集,对认识气候变化和人类活动共同驱动下的干旱区“山地-绿洲-荒漠”系统土壤水分变化具有重要意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Seneviratne S I, Davin E, Hirschi M, Mueller B, Orlowsky B, Teuling A. Soil moisture-ecosystem-climate interactions in a changing climate// AGU Fall Meeting. AGU, 2011. San Francisco Marriott Marquis.
- [2] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 赵文吉, 孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277.
- [3] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, de Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [4] Hu Shoulin, Jia Zhikuan, Wan Sumei. Soil moisture consumption and ecological effects in alfalfa grasslands in Longdong area of Loess Plateau [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 48-53.

- [ 5 ] 杨建军, 吕光辉, 张燕, 塔西甫拉提·特依拜. 艾比湖流域土壤呼吸日变化及水热因子影响. 新疆农业科学, 2009, 46(2): 223-231.
- [ 6 ] 秦璐, 傅德平, 杨军, 何学敏, 张雪妮, 吕光辉. 艾比湖湿地自然保护区典型群落土壤理化性质分析. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 144-151.
- [ 7 ] 张海威, 张飞, 李哲. 不同环境背景下的艾比湖区域土壤水盐差异性特征研究. 干旱区地理, 2017, 40(3): 606-613.
- [ 8 ] 张雅莉, 塔西甫拉提·特依拜, 阿尔达克·克里木, 张东. 艾比湖湿地干湿季土壤水分和土壤盐分空间异质性研究. 中国农村水利水电, 2017, (1): 37-42, 48-48.
- [ 9 ] 朱小强, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 夏楠, 杨童童, 张淑霞. 基于 MODIS 与 Landsat 8 的艾比湖湿地旱情时空变化及其影响因素分析. 生态学报, 2018, 38(8): 2984-2994.
- [ 10 ] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [ 11 ] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. Journal of Hydrology, 1996, 176(1/4): 57-77.
- [ 12 ] Fohrer N, Möller D, Steiner N. An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27(9/10): 655-662.
- [ 13 ] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, Rekolainen S, Bidoglio G. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model. Ecological Modelling, 2003, 169(1): 25-38.
- [ 14 ] Gosain A K, Rao S, Srinivasan R, Reddy N G. Return - flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 673-682.
- [ 15 ] 赵堃, 苏保林, 申萌萌, 管毓堂, 周静雯. 一种 SWAT 模型参数识别的改进方法. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 49-53.
- [ 16 ] 申蒙蒙, 陆忠华, 王彦桐. 水文模拟中并行参数优化算法. 计算机工程与设计, 2017, 38(4): 1002-1007.
- [ 17 ] Kiniry J R, Williams J R, Srinivasan R. Soil and water assessment tool user's manual. Nature Clinical Practice Rheumatology, 2000, 3(3): 119-119.
- [ 18 ] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. SWAT 2009 理论基础. 龙爱华, 邹松兵, 许宝荣, 陆志翔, 尹振良, 汪党献, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2012.
- [ 19 ] 孟现勇, 王浩, 刘志辉, 师春香, 刘时银, 陈曦, 龚伟伟. 基于 CLDAS 强迫 CLM3.5 模式的新疆区域土壤温度陆面过程模拟及验证. 生态学报, 2017, 37(3): 979-995.
- [ 20 ] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究. 土壤通报, 2001, 32(S1): 85-87.
- [ 21 ] Moriasi D N, Arnold J G, van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [ 22 ] 毛飞. 基于风云三号卫星数据的土壤水分遥感反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.