

基于ARIMA预测的草原放牧策略

——以锡林郭勒草原数据为例

龚宸珉, 李军祥, 屈德强, 孔德朝

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年10月25日; 录用日期: 2023年12月14日; 发布日期: 2023年12月22日

摘 要

自“退牧还草”政策以来,我国在保护和改善草原生态环境方面取得了显著成效。放牧作为草原规划的重要部分,其合理规划有助于草原生态环境的稳定,实现草原的可持续发展。本文以锡林郭勒草原2012~2022年的土壤与降水数据为例开展研究。首先,以草原100 cm深度的土壤为对象,建立放牧强度与土壤湿度的放牧策略模型。其次,基于放牧策略不变的前提下,结合历年土壤与降水数据和土壤含水量与牧区供水率和土壤植被覆盖率之间的动力学关系模型,利用ARIMA时间序列预测法对锡林郭勒草原未来土壤与降水进行预测,建立土壤湿度预测模型,并预测出土壤在当前放牧策略下未来20个月内草原土壤100 cm深度的湿度水平。ADF检验和KPSS检验表明,预测结果的置信度水平为95%,可以有效刻画放牧强度与草原地下水资源的关系。本文的研究结果可为草原规划中的放牧策略选择提供参考。

关键词

草原发展, 放牧策略, 时间序列, 预测模型

Grassland Grazing Strategy Based on ARIMA Prediction

—Taking the Data of Xilingol Grassland as an Example

Chenmin Gong, Junxiang Li, Deqiang Qu, Dechao Kong

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 25th, 2023; accepted: Dec. 14th, 2023; published: Dec. 22nd, 2023

Abstract

Since the policy of “returning pasture to grassland”, China has achieved remarkable results in

protecting and improving the grassland ecological environment. As an important part of grassland planning, reasonable planning of grazing helps to stabilize the grassland ecological environment and achieve sustainable development of grassland. This paper takes the soil and precipitation data of Xilingol grassland from 2012 to 2022 as an example to carry out research. Firstly, taking the soil at 100 cm depth of the grassland as the object, the grazing strategy model of grazing intensity and soil moisture is established. Secondly, based on the premise that the grazing strategy remains unchanged, combined with the soil and precipitation data of previous years and the kinetic relationship model between soil water content and pasture water supply rate and soil vegetation cover, the future soil and precipitation in the Xilingol Grassland were predicted using the ARIMA time series prediction method, the soil moisture prediction model was established, and the soil moisture level was predicted for the grassland soil in the next 20 months under the current grazing strategy. The ADF test and KPSS test show that the confidence level of the prediction results is 95%, which can effectively portray the relationship between grazing intensity and grassland groundwater resources. The results of this paper can provide a reference for the selection of grazing strategies in grassland planning.

Keywords

Grassland Development, Grazing Strategy, Time Series, Prediction Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

放牧是草原的主要利用方式之一，家畜的采食和其他活动对草地土壤的含水量具有重要影响。国内外相关研究表明，过度放牧会导致草场退化、土地沙漠化[1]。近年来，过度放牧的现象在我国草原愈发频繁，一定程度上加剧了我国草原的水土流失。为实现草原的可持续发展，我国早在 2003 年就出台了“退牧还草”的相关政策。文献[2]探讨了降水和放牧对草原生物多样性的影响，文献[3]探究了不同放牧强度对草原地上、地下生物量分布的影响。国内外研究表明，地下水资源是草原生态系统可持续发展的关键。然而，截止 2022 年底，关于放牧强度与草原地下水资源的关系却鲜有研究。鉴于此，本文聚焦放牧强度与草原地下水资源的关系，基于土壤-植物-大气系统水分平衡的基本方程，结合锡林郭勒草原降水量和径流量特征，在已有研究的基础上，基于微分方程和动力学理论，建立放牧强度和土壤湿度的关系模型，以期进一步探究最优放牧策略，优化配置草原水资源。

放牧强度和土壤湿度的关系模型仅仅是定性模型，不能定量精细化分析，为此需要数据预测。ARIMA 模型具有能较好地处理许多时间序列数据的特性[4]，如季节性、周期性等，因此在经济学、社会学中有广泛的应用。对此，本文基于锡林郭勒草原 2012~2022 土壤的历史数据，利用土壤含水量与牧区供水率和土壤植被覆盖率之间的动力学关系模型进行数值拟合，得到土壤湿度预测模型，并给出降水量、蒸发量和土壤湿度的预测结果，ADF 检验和 KPSS 检验表明，预测结果的置信度水平为 95%，具有较高的预测准确性。本文所提的放牧强度和土壤湿度的关系模型以及基于 ARIMA 模型的土壤湿度预测模型可以定性和定量分析锡林郭勒草原放牧强度与草原地下水资源的关系，可为草原放牧规划提供参考。

2. 草原放牧策略

草原的水循环是一个降水、渗透和蒸发的循环过程，这个过程非常复杂，在不受干扰的条件下，土

壤-植物-大气系统水分平衡的基本方程为

$$\Delta S_w = S_w^{t+1} - S_w^t = R + P_u + F_{in} - (E t_a + P_d + F_{out} + IR_{store}) \quad (1)$$

其中, ΔS_w 为土壤贮水变化量, 土壤贮水量 S_w 一般是指土壤绝对含水量(也称含水率), 指 100 g 干燥土壤中含有的水分量。测定土壤中的含水量可以帮助我们掌握作物对水的需要情况, 并对农业生产提供重要的指导。影响土壤含水量的因素包括气象因素(主要是降水量)、土壤特征(如孔隙度、容重和渗透性能等)、植被状况以及人类活动。 S_w^t 和 S_w^{t+1} 分别为时间段 t 始末的土壤含水量, R 为降水量, P_u 和 P_d 分别为地下水毛管上升量和土壤水渗透量, $E t_a$ 为实际蒸发量, F_{in} 和 F_{out} 分别为入径和出径流量, IR_{store} 为植被截流量。

锡林郭勒草原地势平坦, 降雨量和降雨强度都较小, 水循环在垂直方向上的水量交换以大部分储存在土壤中的降水为主, 虽然在降雨量较大时会出现局部径流, 但仍可认为整个草原的径流量相等, 因此降水量和径流量可分别表示为

$$R = 0, \quad F_{in} = F_{out} \quad (2)$$

草地的植被量直接决定放牧的强度, 而草地植被的截流量 IR_{store} 能很好地反映植被的生长能力, 依照递推关系, 放牧强度与植被的截流量 IR_{store} 存在正相关关系, 草地植被的截流量 IR_{store} 越大, 放牧强度越高。

植被截流量 IR_{store} 与降水量 R 、植被覆盖度 c_p 、叶面积指数等密切相关。植被覆盖率是植物群落覆盖地表状况的一个综合量化指标, 能够直观反映地表植被的丰度。叶面积指数(LAI), 又称叶面积系数, 反映了单位土地面积上植物叶片的覆盖程度。它是指植物叶片总面积与土地面积的比值, 即 $LAI = \text{叶片总面积} / \text{土地面积}$ 。当降水量较少、植被覆盖度较高且 LAI 较大时, 植被能够截留住更多的降水。这意味着植被能够有效地阻止降水径流, 并使其渗透到土壤中, 有助于提高土壤水分的存储和利用率。因此草地植被的截流量 IR_{store} 可表示为

$$IR_{store} = c_p IR_{max} [1 - \exp(-k R_{cum} / IR_{max})] \quad (3)$$

上式中, IR_{store} 、 c_p 、 IR_{max} 和 k 分别为植被截流量(mm)、植被覆盖率、特定植被的最大截流量和植被密度校正因子; R_{cum} 为累积降雨量(mm)。 IR_{max} 可以通过 LAI 来估算:

$$IR_{max} = a LAI^2 + b LAI + c \quad (4)$$

式中, LAI 为一个分布式的时变参数。即降水量小、植被覆盖度高、LAI 大时, 植被截流量大, 放牧强度高。设置参数 $a = -0.00575$ 、 $b = 0.498$ 、 $c = 0.935$ 。

放牧与植物生长之间满足如下关系[5] [6]:

$$\frac{dw}{dt} = 0.049w \left(1 - \frac{w}{4000} \right) - 0.0047 S w \quad (5)$$

式中, w 为植被生物量, S 为单位面积的载畜率也即放牧强度(单位面积牲畜密度, 只/cm²)。使用 MATLAB 模拟该微分方程分别在单位面积载畜率为 100、200、300、400、500 时的植被生物量与时间的关系, 如图 1 所示。

由参考文献中基于水分平衡原理的内蒙古典型草原土壤水动态模型研究可知, 地下水埋深大于 4 m 后, 地下水毛管上升水对 2 m 土壤水分循环的作用很小。锡林格勒地下水埋藏较深, 多在三、四十米以下, 故地下水毛管上升量对根系层的补给量可忽略不计。基于微分方程和动力学理论, 建立如下放牧强度和土壤湿度的关系模型:

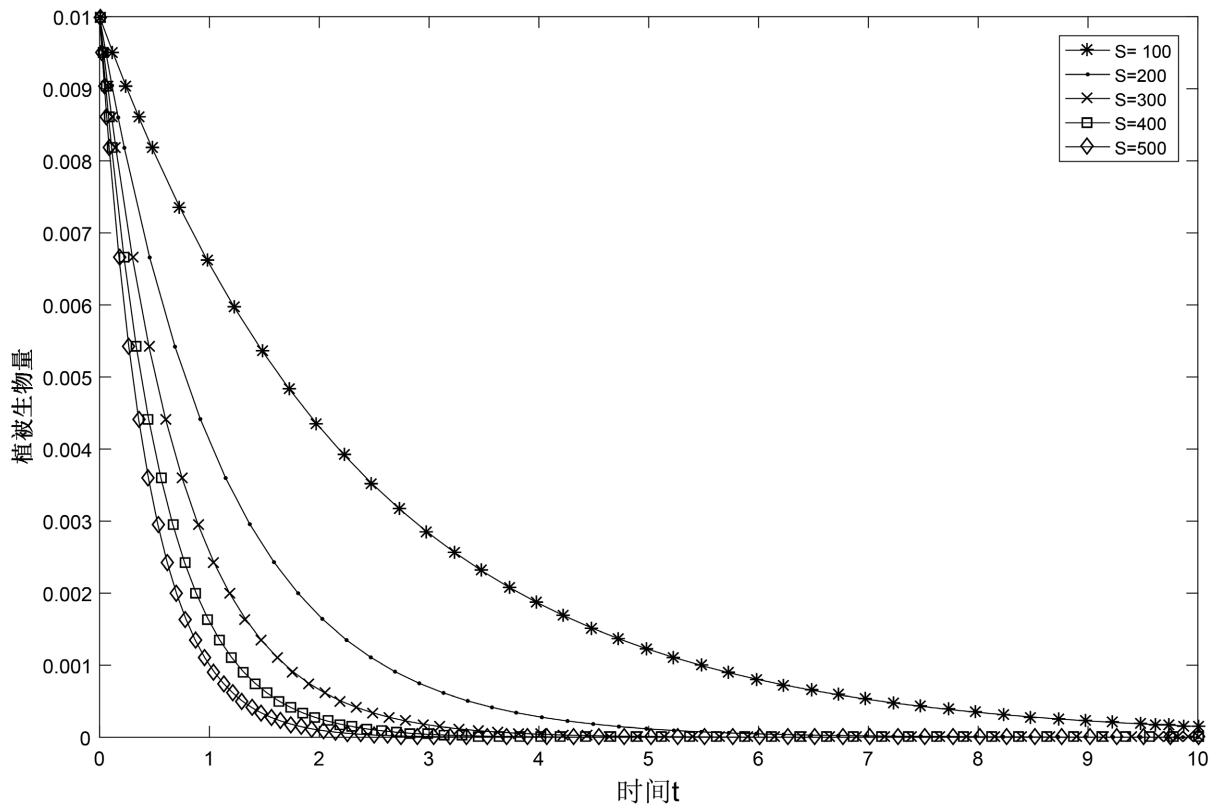


Figure 1. Vegetation biomass plotted against time
图 1. 植被生物量与时间的关系图

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega(t)}{dt} = a\omega(t) \left(1 - \frac{\omega(t)}{b} \right) - cS(t)\omega(t) \\ \Delta S_w = P(t) - E(t) - IR_{store}(t) + F_{in} - F_{out} - G_d \\ c_p(t) = \left[\alpha^* - W \left(e^{\varepsilon_g \omega(t)/\omega^*} - 1 \right) - 1.8S(t) \right] \left(1 - e^{-\varepsilon_g \omega(t)/\omega^*} \right) \\ IR_{store}(t) = c_p \cdot IR_{max}(t) \left[1 - \exp(-k \cdot P(t)/IR_{max}(t)) \right] \\ IR_{max}(t) = -0.00575 \cdot LAI(t)^2 + 0.498 \cdot LAI(t) + 0.935 \end{array} \right. \quad (6)$$

此微分方程组的自变量是 $S(t)$ ：单位面积载畜率(不放牧就是 0，因此 S 包含放牧策略和放牧强度)，时间 t 以月份为单位。湿度 β 与时间 t 和深度 h 有关，根据前后湿度变化进一步推出因变量 1 为含水量变化 ΔS_w ，因变量 2 为生物量 $\omega(t)$ 。

已有的研究[7]也表明多年垂直向土壤水分变化主要发生在 60 cm 以上，90~100 cm 时土壤水分几乎没有变化。由此考虑到大多数年份雨水的入渗深度和实际应用的方便，本研究将土壤水分变化土体厚度确定为 100 cm。

3. 基于 ARIMA 的土壤湿度预测模型

根据锡林郭勒草原 2016~2022 年数据，基于如下土壤含水量与牧区供水率和土壤植被覆盖率之间的动力学关系模型进行 2022 年和 2023 年 100 cm 深度土壤湿度的预测：

$$\frac{d\beta}{dt} = P - E(\alpha) \quad (7)$$

式中, P 为该牧区供水率(主要为降水); E 为地表蒸散发率; β 为土壤含水量(与土壤湿度本质相同, 只是表现方法上有所不同); α 为土壤植被覆盖率可表达为 $\alpha^*G(w)$, w 为成草数量, $G(w) = (1 - e^{-\epsilon_g w/w^*})$ 为草原的盖度, 内蒙古草原盖度在 0.25~0.28 之间, α^* 为最大增长率, 依赖于牧区草地除成草量外的环境条件(如光照、气温、土壤养分等); $D = \beta^* (e^{\epsilon_g w/w^*} - 1)$ 为枯萎率, 其中 ω^* 为该草原群落的特征值只是一个大概的标度, 引入它是使相应的无量纲量例如 w/w^* 中的量级为 1, 便于计算, α^* 为有量纲系数, 其余系数则是无量纲量。

从图 2 中可以看出, 10 cm、40 cm、100 cm 的湿度数据有很明显的季节周期性, 可以考虑时间序列 ARIMA 进行预测。

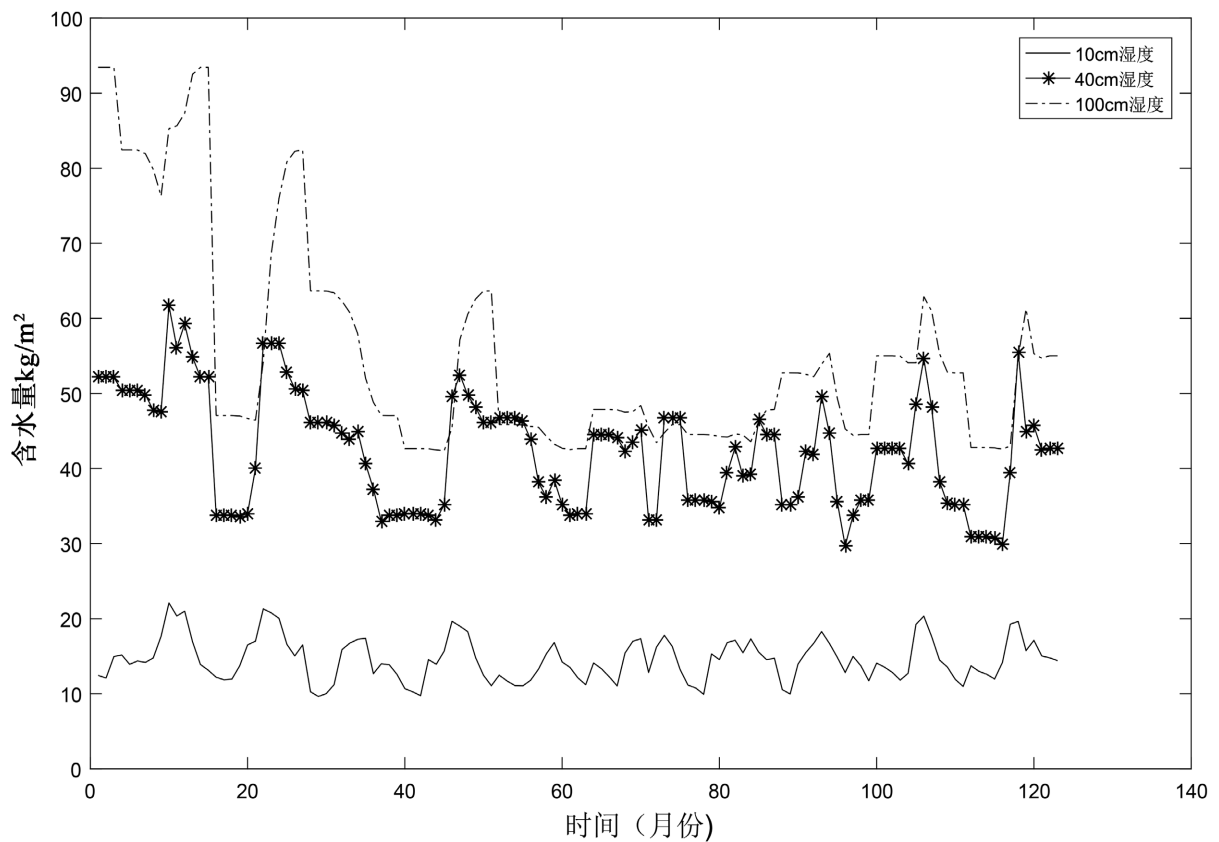


Figure 2. Soil moisture curve
图 2. 土壤湿度曲线

根据上文草原放牧策略建立以下预测模型:

$$\begin{cases} \frac{dS_w}{dt} = P(t) - E(t) - IC_{store}(t) + F_{in} - F_{out} - G_d \\ IC_{store}(t) = c_p(t) \cdot IC_{max}(t) \cdot [1 - \exp(-k \cdot P(t)/IC_{max}(t))] \\ IC_{max}(t) = -0.00575 \cdot LAI(t)^2 + 0.498 \cdot LAI(t) + 0.935 \end{cases} \quad (8)$$

4. 求解

① 通过 ARIMA 时间序列预测降水量、蒸发量、NDVI 等，需要注意季节性，使用季节性时间序列预测(SARIMA)，使用时间序列预测前需要使用平稳性检验。检验方法有很多种，包括 ADF、KPSS、P-P 等。这里用 ADF 检验和 KPSS 检验。另外，Durbin-Watson 统计是计量经济学分析中最常用的自相关度量。该值接近 2，则可以认为序列不存在一阶相关性；

② 由于 LAI 是周期函数，计算未来月份的 LAI，进一步计算未来月份的 $IC_{\max}$ ；

③ 计算未来月份的 $IC_{store}(t)$ ；

④ 根据未来月份的 $IC_{store}(t)$ 和预测的降水量和蒸发量，推导含水量变化；

⑤ 通过含水量变化推导湿度变化。

降水量、蒸发量和土壤湿度的预测结果图 3~图 5 和表 1 所示。图 3~图 5 表明，降水量、蒸发量和土壤湿度的预测结果的置信度水平为 95%，具有较高的预测准确性，这也验证了本文所提出的放牧强度和土壤湿度的关系模型以及基于 ARIMA 模型的土壤湿度预测模型的合理性、可行性和科学性。表 1 给出了锡林郭勒草原 2022 年和 2023 年 100 cm 深度土壤湿度的预测值，有关部门可依据本文预测结果结合具体实际，规划草原放牧策略并对水资源进行优化配置。

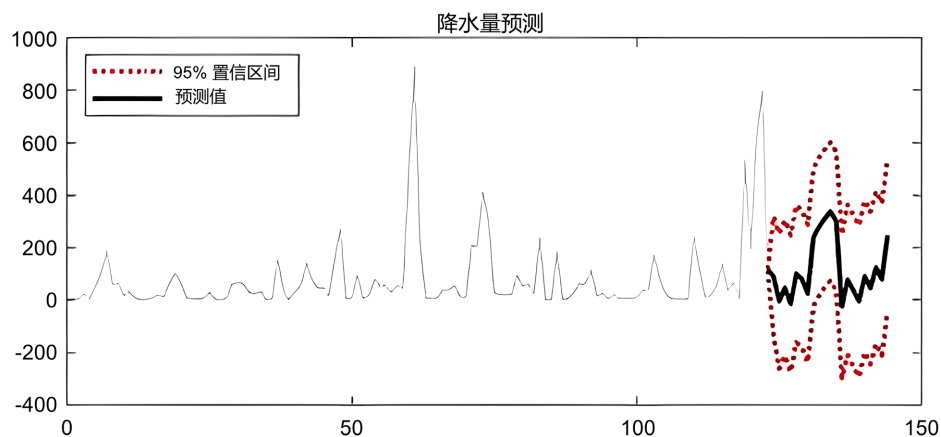


Figure 3. Precipitation forecast curve

图 3. 降水量预测曲线

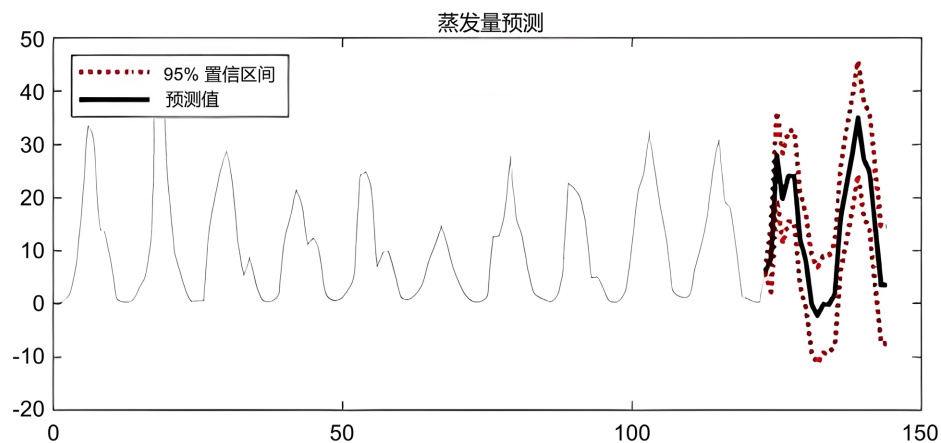


Figure 4. Evaporation prediction curve

图 4. 蒸发量预测曲线

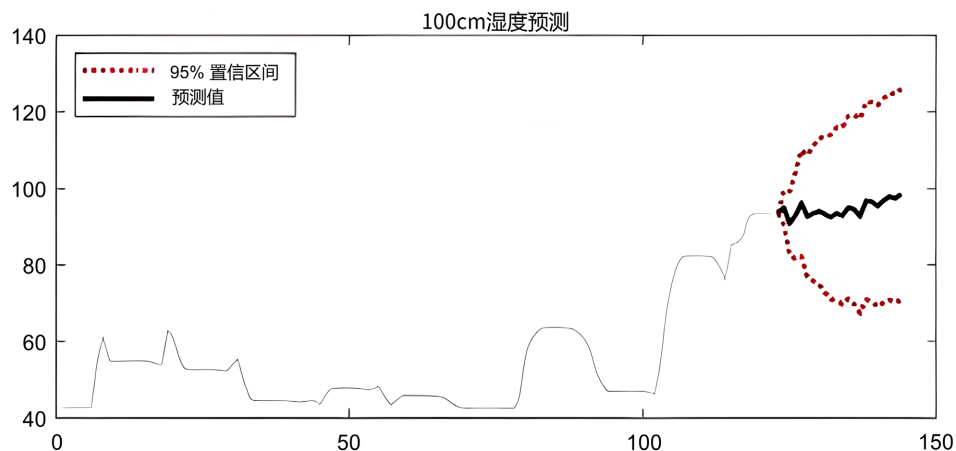


Figure 5. 100 cm soil moisture prediction curve
图 5. 100 cm 土壤湿度预测曲线

Table 1. Results of soil moisture prediction
表 1. 土壤湿度预测结果

2022 年月份	100 cm 湿度(kg/m ²)	2023 年月份	100 cm 湿度(kg/m ²)
01		01	93.4183
02		02	92.8907
03		03	95.0358
04	95.0225	04	94.5263
05	90.8698	05	92.7077
06	92.9681	06	96.7620
07	96.1749	07	96.5262
08	92.6966	08	95.3413
09	93.4447	09	96.8570
10	94.0333	10	97.8609
11	93.2460	11	97.4041
12	92.5091	12	98.4344

5. 结论

本文建立放牧强度和土壤湿度的关系模型，基于 2012 年 1 月至 2022 年 3 月锡林格勒草原土壤湿度历史数据和 ARIMA 时间序列预测法，利用土壤含水量与牧区供水率和土壤植被覆盖率之间的动力学关系模型进行数值拟合，得到土壤湿度预测模型，预测出土壤在当前放牧策略下未来 20 个月内草原土壤 100 cm 深度的湿度水平，预测结果的置信度水平达 95%，具有较高的预测准确性，可以有效刻画放牧强度与草原地下水资源的关系。本文的研究思路与研究方法能够为草原管理局放牧规划提供方法。

基金项目

国家自然科学基金项目(72701130, 71871144, 12071112)，上海理工大学大学生创新项目(XJ2023156)。

参考文献

- [1] 刘敦利. 基于栅格尺度的土地沙漠化预警模式研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [2] 王悦骅. 模拟降水对不同载畜率放牧荒漠草原植物多样性的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [3] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 等. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 768-774.
- [4] 吴会会, 王嘉鹏, 吴文静, 等. 基于 ARIMA 模型的全球气表温度预测分析[J]. 现代信息科技, 2023, 7(16): 147-150.
- [5] 宫海静, 王德利. 草地放牧系统优化模型的研究进展[J]. 草业学报, 2006(6): 1-8.
- [6] Woodward, S.J.R., Wake, G.C. and Mccall, D.G. (1995) Optimal Grazing of a Multi. *Agricultural Systems*, **48**, 119-139.
[https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00013-H](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00013-H)
- [7] 侯琮, 王英舜, 杨泽龙, 等. 基于水分平衡原理的内蒙古典型草原土壤水动态模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 197-203