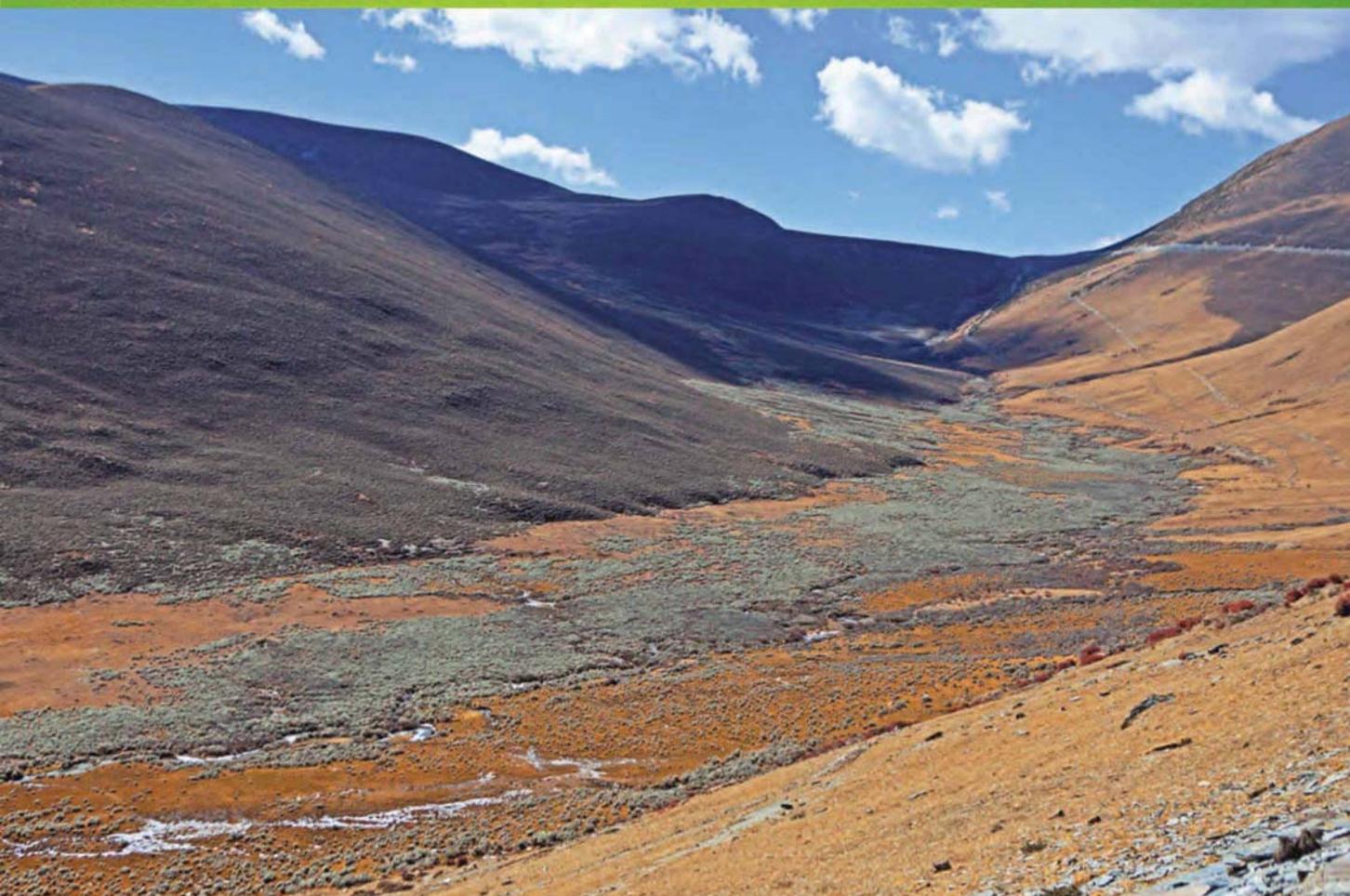


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

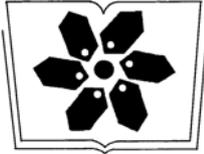
中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 18 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH ₃ 挥发及氮肥利用率的影响	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚昕, 朱广伟, 高光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘森, 胡远满, 等 (5952)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201305221137

范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 徐新文, 王桂芬, 钟显斌, 闫健. 基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究. 生态学报, 2013, 33(18): 5874-5882.

Fan J L, Liu H L, Lei J Q, Xu X W, Wang G F, Zhong X B, Yan J. Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in Hinterlands of Taklimakan Desert. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5874-5882.

基于机器学习模型的沙漠腹地地下水 含盐量变化过程及模拟研究

范敬龙^{1,*}, 刘海龙², 雷加强¹, 徐新文¹, 王桂芬³, 钟显斌³, 闫 健³

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 立命馆大学信息理工学研究科 Emergent System 研究室, 日本滋贺县 525-8577;

3. 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000)

摘要: 为了研究塔克拉玛干沙漠腹地的地下水盐分变化规律, 模拟地下水盐分变化过程, 评价适合该区域的地下水变化规律的模型。通过对研究区蒸发量、降水量、气温、气压、地下水位、地下水电导率数据的统计分析, 揭示了地下水含盐量及其影响因素的特征; 使用 GP 模型、GPLVM 模型和 BP 神经网络模型以及综合模型, 模拟了气候变化和人类活动双重影响下的地下水含盐量变化过程, 并评价了模型的模拟结果。研究表明: (1) 研究区地下水流动系统主要受气候变化和人类活动的影响, 地下水位在局部地区随开采过程呈现波动变化。地下水位变化过程与气压的变化规律相一致; 而气温和蒸发量的季节变化规律相一致。地下水盐分含量呈上升趋势。(2) GP 模型对于地下水含盐量的预测效果最好; GPLVM 模型对于已知地下水含盐量条件下, 与其他环境因素进行多元回归分析的拟合效果最好。而 GP、GPLVM 和 BP 神经网络模型的综合模型, 对于包括模型训练和模型预测的全体数据集的拟合和预测效果最好。

关键词: 地下水含盐量; 高斯过程; 高斯过程隐变量模型; 神经网络; 沙漠腹地

Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert

FAN Jinglong^{1,*}, LIU Hailong², LEI Jiaqiang¹, XU Xinwen¹, WANG Guifen³, ZHONG Xianbin³, YAN Jian³

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Emergent System Lab. Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University, Shiga 525-8577, Japan

3 Petro China Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

Abstract: The Taklimakan Desert, in the center of the Tarim Basin, Northwest China, is near the arid center of the Eurasian Continent. It is an ideal place for carrying out research on circulation systems of ocean-continent and continent-continent, as well as on the environmental effects of the Tibetan Plateau uplift. Oil and natural gas resources are rich in the desert hinterlands, where weather is extremely dry and the ecological environment is extremely frail. How to achieve sustainable development of oil gas energy exploitation and water resources will become a key issue of rapid and sustained energy development in the exploitation area. Since 2000, with the increase of oil and gas production, as well as construction of ecological engineering in oil field areas, regional water use, i. e., water consumption by oil exploitation, life-service water, and ecological engineering water has been increasing. Under this condition, the response of regional groundwater to water-use behavior, and sustainable use of groundwater under scaled development of future oil gas energy, is a focus of discussion in academic circles. All the water used for oil field production, living, and an ecological shelterbelt program in the Tarim oil field was supplied by 19 local water wells. The main groundwater was from surrounding snow cover and glacier

基金项目: 中国科学院西部博士专项(XBBS200904); 国家自然科学基金项目(41030530, 41271341); 塔里木油田科技项目(971012080007)

收稿日期: 2013-05-22; **修订日期:** 2013-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjl@ms.xjb.ac.cn

meltwater that leak into the groundwater system at a mountain pass, which then inflows slowly as runoff with terrain change. There is a single chemical type of groundwater in the study area, which is mainly alkali and a strong acid ion. Groundwater is an important resource within desert areas, for both human use and maintenance of the ecological environment. However, little information is available on the long-term change and evolutionary trends of groundwater salt content in the region. The aim of this study is to increase knowledge of such content and its influences there. We simulated this content, studied its change, and evaluated the effects and applicability of machine learning models for the hinterland of Taklimakan Desert. For these purposes, three machine learning models and an appropriate integrated model were designed to simulate the variation of groundwater salt content. Based on statistical analysis of evaporation, precipitation, air temperature, air pressure, groundwater level and conductivity, this paper reports some statistical features of that content and its influences. The temporal change of content was simulated using Gaussian Process (GP), Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM), Back Propagation Artificial Neural Network (BP-ANN), and an integrated machine learning model, under the impacts of climate change and human activities. The modeling was evaluated using root mean square error (RMSE) and uncentered R-squared (uncentered R^2). The results show that the groundwater flow system is affected by climate change and human activities, and groundwater level appears steady with small fluctuation in the study area. The change of groundwater level was concordant with air pressure, and the change of air temperature was consistent with evaporation. There was an overall uptrend of groundwater salt content. Accurate prediction can be achieved with GP, whereas GPLVM was the better multiple regression method for a known groundwater salt content among the three models. The integrated model of GP, GPLVM, and BP-ANN gave the best results for all observation datasets, including training and prediction data. The results not only help clarify regional hydrologic cycle processes under extremely dry conditions, but can also provide appropriate theoretical evidence for sustainable utilization of water resources and safe production in desert oilfields.

Key Words: groundwater salt content; gaussian process; gaussian process latent variable model; back propagation artificial neural network; hinterlands of taklimakan desert

基于物理基础的概念模型和数值模拟技术,是当前水文过程演化研究的主流工具。然而,在实际应用中有一定的局限性,特别是在缺乏水文地质资料和观测点很少的地区。此时,一些经验模型和统计学基础上的“机器学习”^[1]模型,成为更理想的精确模拟区域水文过程变化的研究方法。它们在水文过程研究中,可以综合考虑水文过程曲线的多个影响因子,将其纳入一个非线性开放系统中,这就避开了分布式水文模型中,必须建立概念模型和必须已知或估计全部水文参数的计算过程。其中,人工神经网络被成功的用于预测地下水位^[2-5]和进行水资源可持续利用管理^[6-7],在降水、水质模拟等研究中的应用也十分活跃^[8]。高斯过程^[9]和高斯隐空间模型^[10-11]在许多研究领域内都得到广泛应用和发展,而在水文学研究中的应用尚不多见。塔里木盆地是世界第一大内陆盆地,位于亚欧大陆腹地,属大陆暖温带、极端干旱沙漠气候,降水稀少而蒸发强烈^[12]。沙漠腹地油气开发区的地下水,主要来源于盆地南部的昆仑山融雪径流补给,近年来由于生态工程建设和油气生产需求,地下水资源得到了一定程度的开发,也使得原本地下水位、水质等受到人类活动干扰而产生变化^[13]。本文目的在于如何借助“机器学习”方法,理解地下水含盐量的变化过程,以及预测其演化趋势;评价3种机器学习模型及其综合模型的结果,使模拟计算在本区域的应用更为合理,预测结果更为逼真。

1 研究区概况

研究区位于塔里木盆地中部塔克拉玛干流动沙漠腹地,塔中油田供水水源地。塔中油田是塔里木油田的重要稳产区块。北距轮台县约340 km,南距315国道约150 km,贯通其中的道路就是举世瞩目的“塔里木沙漠公路”。研究区内没有地表水分布,生产、生活用水完全依靠开采地下水。水源地共建有抽水井19口,布井密度为1.5口/km²,抽水量约300×10⁴ m³/a。根据塔中气象站资料,该地年平均气温12.7℃,年降水量10.7 mm,年蒸发为3806.4 mm^[14]。该区域降水与凝结水对地下水几乎没有补给意义^[15],补给源主要是周边山地积雪冰川融水在出山口渗入入地下水系统后随地势变化产生的极为缓慢的径流的汇入,另一方面来自深入沙漠的河道汛期河水的侧向渗漏。沙漠区地下水流速缓慢,平均流速0.01 cm/min^[16],其主要排泄方式以沙垄间洼地的蒸发作用为主。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理方法

数据主要来源于中国科学院塔克拉玛干沙漠研究站(39°00' N, 83°40' E, 海拔高度1099.3 m, 地理位置如图1所示), 自动

气象水文监测站观测数据,该测站主要采集逐时区域太阳辐射、日照、气温、地下水环境等数据。降水量(20—20 时)和蒸发量数据来自于《中国国际交换站地面气候标准值月值数据集》(中国气象科学数据共享服务网)。本文使用的数据包括:蒸发量、降水量、气温、气压、地下水位、地下水电导率。本文涉及到的数据为月平均数据。将 2005 年 1 月到 2009 年 12 月的数据作为模型的学习集;2010 年 1 月到 2010 年 5 月的数据作为模型的测试集。

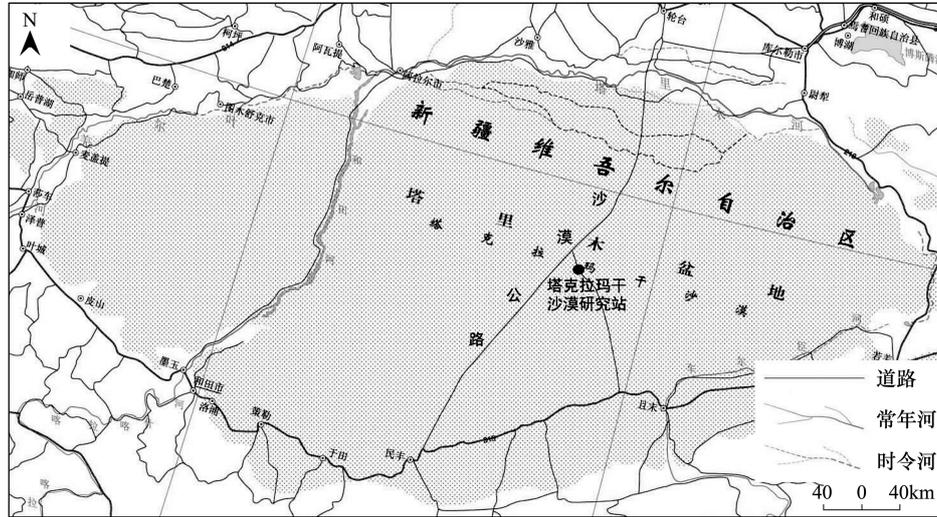


图1 塔克拉玛干沙漠研究站地理位置
Fig.1 Location of The Taklimakan Station for Desert Research

在模型中,定义学习集为 (X, Y) , 其中 $X \in R^{N \times D_x}$, $Y \in R^{N \times D_y}$, 式中 $N = 60$ 表示数据量; $D_x = 5$ 和 $D_y = 1$ 分别表示 X 和 Y 的维度; X 和 Y 中的向量分别定义为 $x \in R^{D_x}$ 和 $y \in R^{D_y}$; $x_i = (\text{蒸发量, 降水量, 气温, 气压, 地下水位})$, ($i \in Z, 1 \leq i \leq N$); $y_i = (\text{地下水电导率})$, ($i \in Z, 1 \leq i \leq N$)。

通过高斯过程(GP)、高斯过程隐变量模型(GPLVM)和人工神经网络(ANN)来进行地下水电导率演化趋势的模拟及预测,最后汇总 3 种机器学习模型的预测值,并使用综合投票的计算结果作为综合模型的输出结果。通过比较每种机器学习模型得到的预测结果的误差,来评价模型的适用性。人工神经网络模型中,选用前馈网络中的 BP 神经网络(BP-ANN)进行模拟运算。模型结构如图 2 所示,每种模型都通过输入层将地下水含盐量变化的影响因素数据输入其中,经过中间过程的计算,得到地下水含盐量数据(输出层)。最后,对 3 种模型的预测结果进行综合投票,得出综合模型的预测值。

2.2 机器学习模型

高斯过程又称正态随机过程,它提供了一种基于前验分布应用于函数空间的贝叶斯机器学习方法。其算法的原理是先使用核算法,把非线性分布的观测数据映射到一个高维特征空间,在该空间内使用基于高斯分布的线性贝叶斯模型来进行回归或者分类学习。其似然方程如式(1):

$$P(Y|X) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N \times D_y}{2}} |K|^{\frac{D_y}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr}(Y^T K^{-1} Y)\right) \tag{1}$$

式中, K 是通过核算法生成的协方差矩阵,如式(2):

$$K = \begin{bmatrix} k(x_1, x_1) & \cdots & k(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_N, x_1) & \cdots & k(x_N, x_N) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式(2)协方差矩阵 K 中, $k(x, x')$ 为核函数,本文所用核函数为 RBF+ Linear,如式(3)所示:

$$k(x, x') = \alpha_1 \exp\left(-\frac{1}{2\alpha_2} (x - x')^T (x - x')\right) + \alpha_3 x^T x' + \beta^{-1} \delta_{x, x'} \tag{3}$$

式(3)中定义超参数为 $\theta = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta)$, 并用随机数来初始化。 $\delta_{x, x'}$ 为狄拉克 δ 函数,用来生成函数空间里服从正态分布 $N(0, 1)$ 的高斯噪音。通过最大似然估计,来计算式(1)的最大似然。为了简化计算,式(1)对数化后得到式(4),并用 BFGS 法来对超参数 θ 进行最优化:

$$L \approx -\frac{D_y}{2} \log |K| - \frac{1}{2} (\text{tr}(Y^T K^{-1} Y)) \tag{4}$$

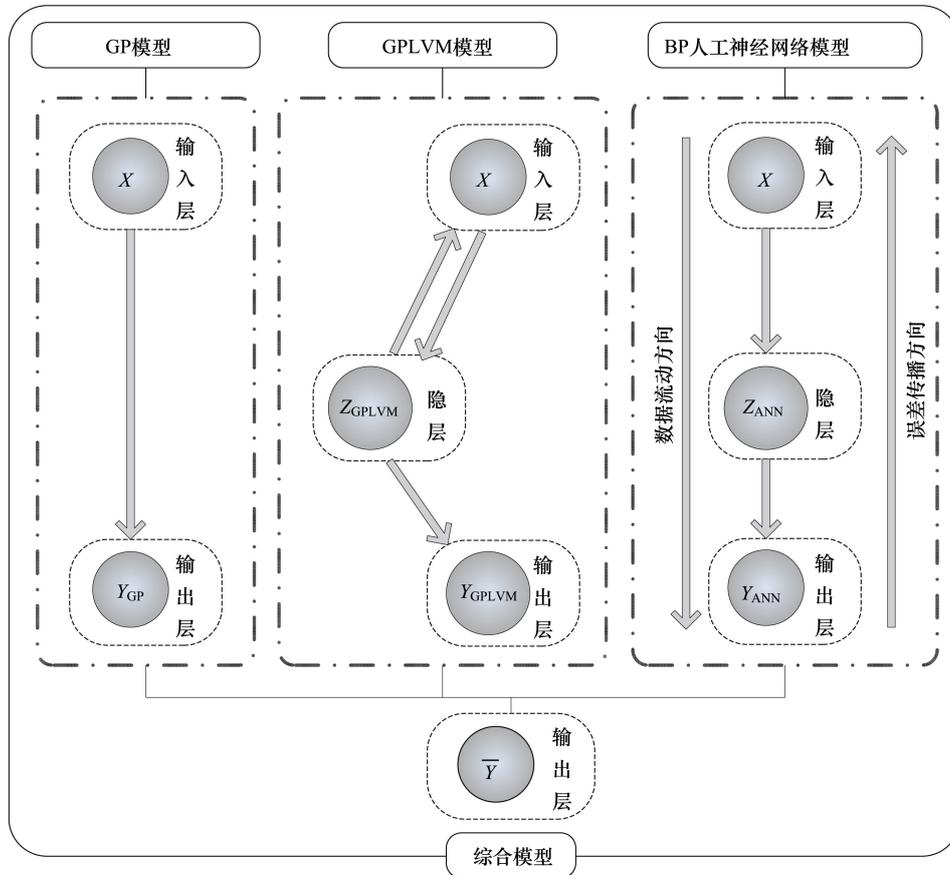


图2 机器学习模型结构示意图

Fig.2 Model Architectures on Machine Learning Models

为了加快学习速度,使用稀疏高斯过程(SGP)来进行回归分析,其中,使用基于主动学习理论的信息向量机^[17](IVM)选择一个数据量远小于学习集的活跃集,并使用该活跃集进行高斯过程学习。预测时,输入新向量 $x^* \in R^{D_x}$,使用最优化后的超参数 θ ,通过式(5)算出 x^* 对应的输出期望值 $y_{GP}^* \in R^{D_y}$:

$$y_{GP}^* = Y^T K^{-1} k_{x,x^*} \tag{5}$$

式中, $k_{x,x^*} = (k(x_1, x^*), k(x_2, x^*), \dots, k(x_N, x^*))$ 为输入向量 x^* 和学习集 X 里所有向量的协方差向量。

高斯过程隐变量模型是在高斯过程的输入层和输出层之间,用概率主成分分析(PPCA)对学习集进行降维处理来生成隐层,可以有效地找到观测数据在低维隐空间中的流形,有效地提高了高斯过程隐变量模型相对于高斯过程的映射精度。

首先用主成分分析(PCA)来初始化隐层 $Z_{GPLVM} \in R^{N \times D_z}$, D_z 为隐空间的维度。然后通过联合似然 $P(X, Y, Z_{GPLVM})$ 进行最大似然估计,优化隐空间的流形:

$$P(X, Y, Z_{GPLVM}) = P(X | Z_{GPLVM}) P(Y | Z_{GPLVM}) P(Z_{GPLVM}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N \times D_x}{2}} |K_x|^{\frac{D_x}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr}(X^T K_x^{-1} X)\right) \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N \times D_y}{2}} |K_y|^{\frac{D_y}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr}(Y^T K_y^{-1} Y)\right) \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N \times D_z}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \|z_{GPLVM_i}\|^2\right) \tag{6}$$

这里同样使用了 RBF+ Linear 核函数(式3)。式(6)中 K_x 为 X 的协方差矩阵, K_y 为 Y 的协方差矩阵。 Z_{GPLVM} 的先验概率分布,定义为正态分布 $N(0, 1)$ 。 $z_{GPLVM} \in R^{D_z}$ 是矩阵 Z_{GPLVM} 中的第 i 个向量。式(6)对数化,得到式(7)。同样使用 BFGS 法来计算最优化的 $Z_{GPLVM} \rightarrow X$ 和 $Z_{GPLVM} \rightarrow Y$ 两个映射的超函数 $\theta_{z \rightarrow x}$ 和 $\theta_{z \rightarrow y}$ 以及隐层 Z_{GPLVM} 。最后我们再用稀疏高斯过程来最优化 $X \rightarrow Z_{GPLVM}$ 映射的超函数 $\theta_{x \rightarrow z}$:

$$L_{x,y,z} \approx -\frac{D_x}{2} \log |K_x| - \frac{1}{2} (\text{tr}(X^T K_x^{-1} X)) - \frac{D_y}{2} \log |K_y| - \frac{1}{2} (\text{tr}(Y^T K_y^{-1} Y)) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \|z_{GPLVM_i}\|^2 \tag{7}$$

为了加快学习速度,分别对这两个映射使用了信息向量机,选择出一个数据量远小于学习集的活跃集,并使用该活跃集进行高斯过程学习。预测时,输入新向量 $x^* \in R^{D_x}$,通过式(8)和式(9)可以算出 x^* 对应的输出期望值 $y_{GPLVM}^* \in R^{D_y}$:

$$z_{\text{GPLVM}}^* = Z_{\text{GPLVM}}^T K_X^{-1} k_{X,x}^* \quad (8)$$

$$y_{\text{GPLVM}}^* = Y^T K_{Z_{\text{GPLVM}}^*}^{-1} k_{Z_{\text{GPLVM}}^*} \quad (9)$$

式中, $k_{Z_{\text{GPLVM}}^*} = (k(z_{\text{GPLVM}1}, z_{\text{GPLVM}}^*), k(z_{\text{GPLVM}2}, z_{\text{GPLVM}}^*), \dots, k(z_{\text{GPLVM}N}, z_{\text{GPLVM}}^*))$ 为输入向量 z_{GPLVM}^* 和隐层数据 Z_{GPLVM} 里所有向量的协方差向量, $K_{Z_{\text{GPLVM}}^*}$ 为隐层数据 Z_{GPLVM} 的协方差矩阵。

人工神经网络(ANN),是对人脑或自然的神经网络若干基本特性的抽象和模拟,是一种非线性的动力学系统。它具有大规模并行处理和分布式信息存储能力,良好的自适应性、自组织性及很强的学习、联想、容错及抗干扰能力。目前人工神经网络模型有数十种,其中 BP 人工神经网络是前馈网络的核心部分,是在实际应用中被用得最多、最成功的神经网络学习算法。BP 神经网络算法由 Rumelhart D E, Hintont G E 和 Williams R J 正式发明^[18],网络由若干层神经元组成,它们可分为输入层、隐层和输出层(图 1),各层的神经元作用都是不同的。输入数据从输入层经隐层传向输出层,如果在输出层得不到期望输出,则转入反向传播,将误差信号沿原通路返回,通过机器学习过程,不断修正各层神经元的权值,使误差最小。本文使用了 3 层神经网络,隐层和输出层神经元传递函数分别采用 Tansig 函数(式 10)和 Purelin 函数(式 11):

$$Z_{\text{ANN}} = \text{Tansig}(W_X^T X + b) = \frac{2}{1 + \exp(-2(W_X^T X + b))} - 1 \quad (10)$$

$$Y_{\text{ANN}} = \text{Purelin}(W_Z^T Z_{\text{ANN}} + b) = a(W_Z^T Z_{\text{ANN}} + b) + c \quad (11)$$

式中, W_X 和 W_Y 分别是输入层和隐层的权重矩阵, a, b, c 分别是参数的向量。利用 Premmx 函数进行原始数据归一化。采用 Trainngdx 算法训练 BP 人工神经网络,并优化权重矩阵 W_X 和 W_Y ,以及参数向量 a, b, c 。

最后,为了得到更好的预测精度和泛化能力,使用了集成学习的方法,让 3 种模型进行综合投票。投票的方式我们选择每一种模型占最后结果的 1/3,并取其总和作为综合模型的输出结果(式 12)。

$$\bar{Y} = \frac{1}{3}(Y_{\text{GP}} + Y_{\text{GPLVM}} + Y_{\text{ANN}}) \quad (12)$$

本文所用稀疏高斯过程和高斯隐空间模型采用自制回归程序。高斯过程中,活跃集大小为 6, BFGS 的迭代次数为 1000,目标误差为 0.1。高斯隐空间模型中,隐空间维度 $D_Z = 2$,活跃集大小为 6, BFGS 的迭代次数为 300,目标误差为 0.1。BP 人工神经网络,使用 Matlab8.0 神经网络工具箱建立和训练。隐层 10 个神经元,地下水电导率作为输出数据。学习率为 0.03,训练目标误差为 10^{-4} 。

2.3 误差分析

均方根误差(RMSE),为回归系统的拟合标准差,是均方差(MSE)的平方根,也就是预测数据和原始数据对应点误差的平方和的均值的平方根,计算公式如式 13 所示,计算结果越接近于 0,说明模型选择和拟合更好,数据预测也越成功。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

采用非中心化决定系数评价输出数据的拟合效果。Un-centered R^2 是解释变量的变异能够解释的因变量变异的比列。在回归过程不包含常数项时,用来替代决定系数 R^2 。是通过数据的变化来表征一个拟合的好坏。其正常取值范围为[0—1],越接近 1,表明模型对数据拟合的越好。其计算公式如式(14):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i^2 + \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

式中, y_i 代表观测值, \hat{y}_i 代表预测值。

3 结果与分析

3.1 地下水含盐量的影响因素

地下水盐分含量受气候变化和人类活动的双重影响,其变化过程是复杂和多样的。一般认为,天然地下水系统中,电导率与含盐量数值上为线性正相关关系,因此可以用电导率表征地下水盐分含量^[19]。为了更好地反应地下水盐分变化的影响因素,选择塔中地区长期气象、地下水观测站的蒸发量、降水量、气温、气压、地下水水位变化等环境因素的月平均数据,来反映地下水盐分的变化。研究区自然驱动力弱,无地表水的直接补给,地下水水位的变化主要取决于抽水作用,可用地下水水位的变化来反映人类活动的影响。而地下水水位的变化又与气压、气温、降水、蒸发等气象因素有关。因此,我们选择气压、气温、降水量和蒸发量这几个与地下水含盐量变化有关的因素,分析其变化过程规律。从图 3 可以看出:除降水量表现为下降趋势外,其他因素都呈现季节性波动变化规律。其中地下水水位变化过程与气压的变化过程相一致(1 月份表现为波峰,5—6 月份表现为波谷),而气温和蒸发的季节变化过程相一致(1 月份表现为波谷,6—7 月份表现为波峰)。

3.2 地下水含盐量及其影响因素的统计特征

由表 1 可知:研究区降水非常稀少而蒸发潜力异常强大,蒸发量的标准差和极差都很大,说明蒸发因素对系统的贡献相对

较大,气温影响次之。降水量的变异系数较大,在时间上离散程度较高,年内和年际变化不均。地下水位的标准差、标准误、极差和变异系数都很小,是整个研究系统中比较稳定的因素。由于本区域地下水除了自然波动外,只有沙漠油田的工业、生态和生活用水过程对地下水水位起作用,说明人类活动的强度较低,对系统的影响较小。地下水电导率的变异系数大于地下水位,说明在人类活动和气候变化双重影响下,地下水含盐量发生了一定程度的变化。

从总体数据集的 Pearson 相关系数矩阵看(表 2),电导率仅与地下水位呈显著正相关关系($P = 0.0018$),与其他环境因素无显著关系($P > 0.05$)。而蒸发量、降水量、气温、气压、地下水位两两之间都具有显著相关关系。从数据上看,地下水位与蒸发量、降水量、气温呈负相关关系。但是,这并不能说明地下水位与降水量负相关,实际上,由于研究区年降水仅 10.7 mm,在强大的蒸发作用下,降水对地下水基本没有补给意义,地下水位监测点位于水源地中心抽水漏斗区,地下水位的波动主要受抽水作用和其他因素的影响较大,而和降水量的关系不大。然而蒸发过程是沙漠区水文过程的主体,其对于沙漠地下水环境的影响是不可忽视的,而蒸发过程受到温度、大气、水分等诸多条件的影响。因此局部地区的地下水含盐量的变化,其影响因素是复杂多变的,其变化与气候因素和地下水位等诸多条件都有关系。

3.3 地下水含盐量的模型预测

利用水位、气压、温度、降水量、蒸发量与地下水含盐量的相互关系,通过 4 种模型(高斯过程模型、高斯过程隐变量模型、BP 神经网络模型、以及上述 3 个模型的综合模型),对地下水含盐量的变化过程进行回归分析。如果该方程能很好地反映地下水盐分的变化规律,则可以利用该方程定量描述研究区地下水含盐量的长期变化过程。模型计算结果如图 4 所示,可以看出对于学习集的拟合,3 种模型都能做的很好。而测试集中,BP 神经网络模型的波动最大,GP 模型的波动最小。而 3 种模型的综合模型,即 GP、GPLVM、BP 神经网络预测结果的综合投票模型,其整体表现要优于单独使用上述 3 种模型。

从模型运算结果的均方根误差值可以定量的看出,对于全体数据集(即图 5 所示的“整体集”)的模拟,表现最优的是综合模型,其 RMSE 最小,GPLVM 模型表现次之;对于学习集的回归过程,表现最好的是 GPLVM 模型;对于测试集的回归,表现最好的是 GP 模型。从 Un-centered R^2 值可以看出,整体集的拟合效果,综合模型依然稍显优势;学习集的拟合效果,GPLVM 模型和综合模型略好于其余模型;测试集的拟合依然是 GP 模型的表现最好。

GP、GPLVM 和 BP-ANN 都具有很好的非线性数据逼近能力。其中 BP-ANN 和 GPLVM 都采用隐层抽取数据的特征值,让数据仅由其特征值来映射到目标值。因此实验结果中,对于学习集,BP-ANN 和 GPLVM 的精度都优于 GP。但是 GP 和 GPLVM 都采用了 Kernel 方法,把非线性数据映射到一个无限维度的高维特征空间,从而大幅增强了数据的表现力。即使 BP-ANN 抽取

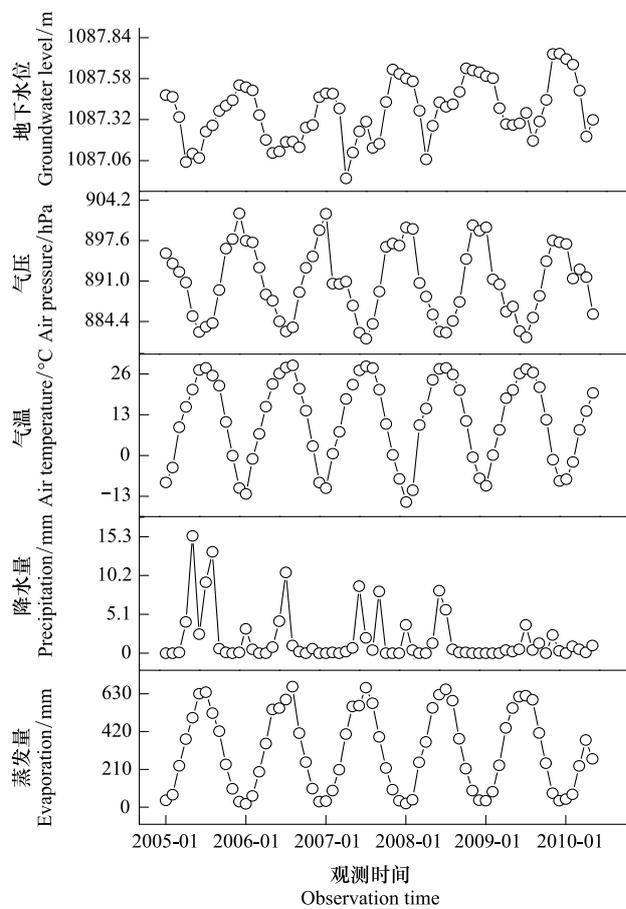


图 3 地下水含盐量的影响因素随时间的变化

Fig. 3 Influencing Factors on Change of the Groundwater Salt Contents

表 1 地下水含盐量及其影响因素的描述性统计分析

Table 1 The Descriptive Statistics of Groundwater Salt Content and Its Influencing Factors

变量 Variable	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Mean	标准差 Std dev	标准误 Std error	极差 Range	变异系数 Coeff of variation
蒸发量 Evaporation/nm	669.600	18.400	310.346	223.767	27.755	651.200	72.102
降水量 Precipitation/nm	15.400	0.000	1.825	3.394	0.421	15.400	186.023
气温 Air temperature/°C	28.758	-14.874	11.200	13.704	1.700	43.632	122.355
气压 Air pressure/hPa	902.029	881.590	890.935	5.947	0.738	20.439	0.668
地下水位 Groundwater level/m	1087.738	1086.947	1087.372	0.190	0.024	0.791	0.017
电导率 Conductivity/(ms/cm)	6.953	5.356	5.898	0.438	0.054	1.596	7.424

表 2 地下水含盐量及其影响因素的 Pearson 相关矩阵

Table 2 Pearson Correlation Coefficients matrices of Groundwater Salt Content and Its Influencing Factors

	蒸发量 Evaporation	降水量 Precipitation	气温 Air temperature	气压 Air pressure	地下水水位 Groundwater level	电导率 Conductivity
蒸发量 Evaporation	1.0000	0.4452	0.9639	-0.9269	-0.7229	0.0047
降水量 Precipitation	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.9705	-0.1648
气温 Air temperature	0.4452	1.0000	0.4073	-0.4607	-0.3040	-0.1648
气压 Air pressure	0.0002	0.0008	0.0001	0.0138	0.1897	-0.0173
地下水水位 Groundwater level	0.9639	0.4073	1.0000	-0.9244	-0.7339	-0.0173
电导率 Conductivity	<0.0001	0.0008	<0.0001	<0.0001	0.8911	0.8911
	-0.9269	-0.4607	-0.9244	1.0000	0.6569	-0.0544
	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.6669	0.6669
	-0.7229	-0.3040	-0.7339	0.6569	1.0000	0.3795
	<0.0001	0.0138	<0.0001	<0.0001	0.0018	0.0018
	0.0047	-0.1648	-0.0173	-0.0544	0.3795	1.0000
	0.9705	0.1897	0.8911	0.6669	0.0018	0.0018

单单元格上方为相关系数,下方为 P 值;在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平上, $P > 0.05$ 接受零假设; $N = 65$

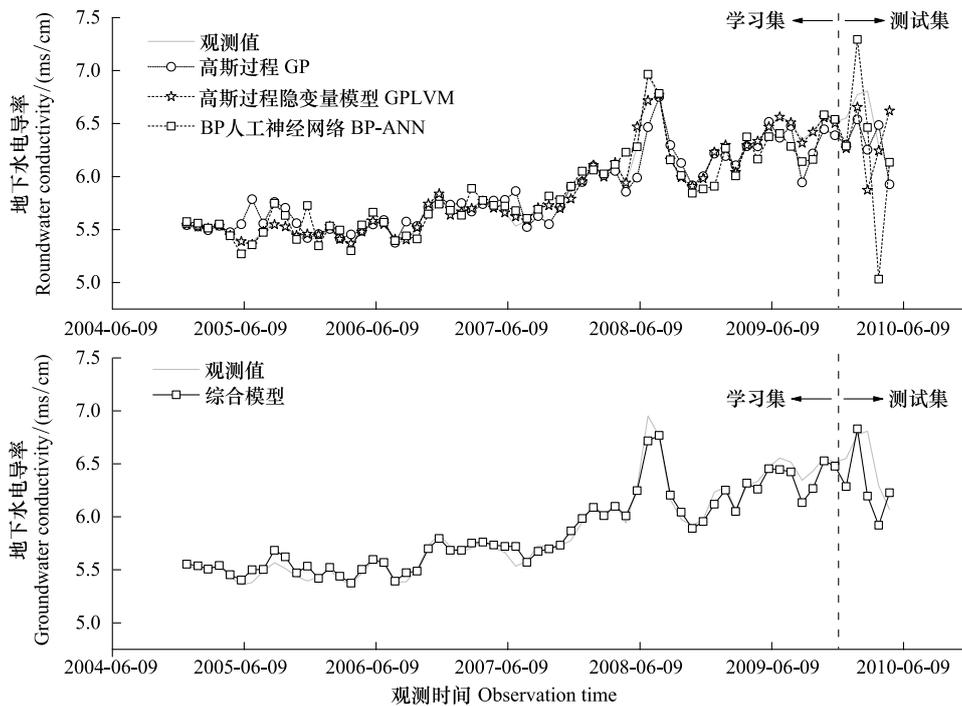


图 4 机器学习模型的学习与预测结果

Fig.4 The Study and Predicted Results of Machine Learning Models

了数据的特征值,但是其数据本身的表现力弱于 GP 和 GPLVM,所以对于测试集和整体集,BP-ANN 的预测精度都弱于 GP 和 GPLVM。

这 3 种模型都有不同程度的预测误差和泛化性能,所以我们使用了集成学习的方法,来形成综合模型。从实验结果来看,对于学习集,综合模型的精度稍微弱于 GPLVM。对于测试集,综合模型的精度稍微弱于 GP。由于综合模型优化了 GP,GPLVM 和 BP-ANN 的精度和泛化性能,使其对整体数据集有了更好的预测能力,因此对于整体集,综合模型的精度优于其他 3 种模型。

4 结论

(1) 本文研究的区域系统中,地下水流动系统主要受气候变化和人类活动的影响,地下水水位在局部地区随开采过程呈现波动变化。地下水水位变化过程与气压的变化规律相一致;而气温和蒸发量的季节变化规律相一致。研究区内降水量极为稀少而蒸发潜力异常强大,表征人类活动的地下水水位变化,在所涉及的几个影响因素中的表现最为稳定。因此地下水含盐量的变化主

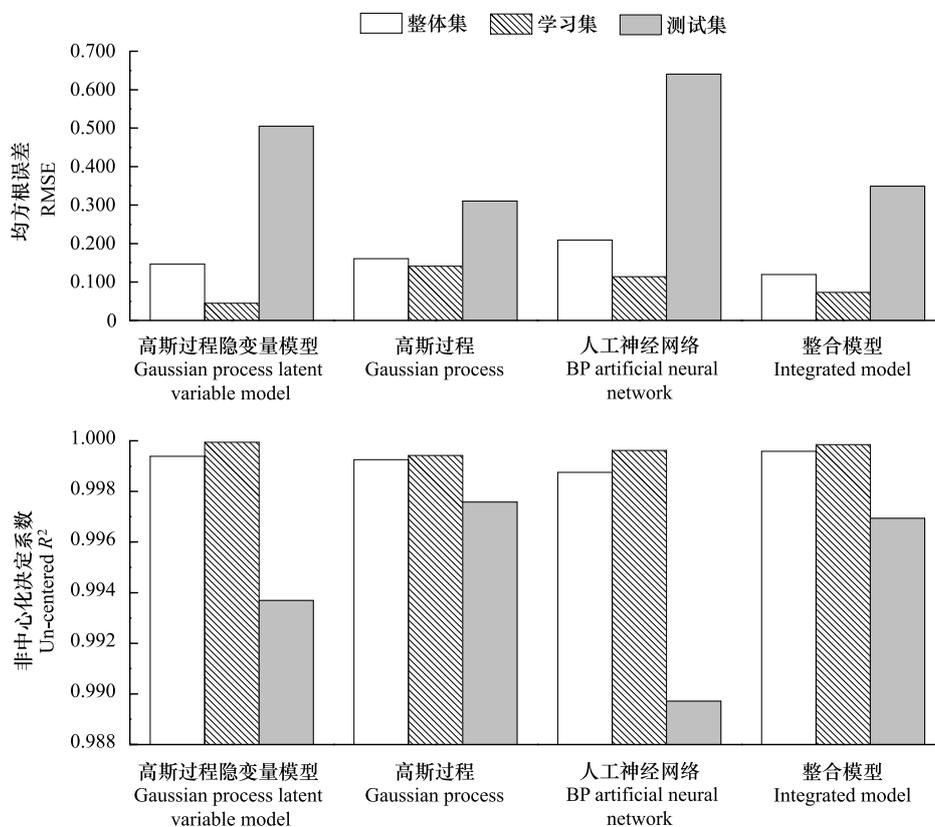


图 5 机器学习模型的误差分析

Fig.5 The error analysis of machine learning models

要受气候变化的影响较多,地下水盐分含量呈上升趋势。

(2)通过地下水含盐量及其影响因素的机器学习模型识别,从测试集和学习集拟合结果及其误差分析可知:GP 模型对于地下水含盐量的预测效果最好;GPLVM 模型对于已知地下水含盐量条件下,与其他环境因素进行多元回归分析的效果最好。而 GP、GPLVM 和 BP-ANN 3 种模型的综合模型,由于综合了 3 种模型的计算结果,优化了模拟精度和泛化能力,其模拟结果对于再现整个观测过程中,地下水含盐量与其影响因素的相互关系上,表现最好。

References:

- [1] Mjolsness E, DeCoste D. Machine learning for science: state of the art and future prospects. *Science*, 2001, 293(5537): 2051-2055.
- [2] Coulibaly P, Anctil F, Aravena R, Bobée B. Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 885-896.
- [3] Daliakopoulos I N, Coulibaly P, Tsanis I K. Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1/4): 229-240.
- [4] Coulibaly P, Anctil F, Bobée B. Multivariate reservoir inflow forecasting using temporal neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2001, 6(5): 367-376.
- [5] Coulibaly P, Bobée B, Anctil F. Improving extreme hydrologic events forecasting using a new criterion for artificial neural network selection. *Hydrological Processes*, 2001, 15(8): 1533-1536.
- [6] Song S B, Cai H J. Artificial neural network model for assessing the sustainable utilization of regional water resources. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(6): 89-92.
- [7] Hu T S, Yuan P, Din J. Applications of artificial neural network to hydrology and water resources. *Advances in Water Science*, 1995, 5(1): 76-82.
- [8] Govindaraju R S, Rao A R. *Artificial Neural Networks in Hydrology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [9] Rasmussen C E. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Cambridge: The MIT Press, 2006.
- [10] Wang X M, Gao X B, Li J. A new classification algorithm based on gaussian process latent variable model. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(12): 2661-2667.

- [11] Liu H L, Taniguchi T. Human-robot interaction based on Gaussian process latent variable model. Proceedings of the 57th Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineering. Kobe: The Institute of Systems, Control and Information Engineers, 2013: CD-111-2.
- [12] Zhang H, Wu J W, Zheng Q H, Yu Y J. A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3): 545-553.
- [13] Fan J L, Xu X W, Lei J Q, Zhao J F, Li S Y, Wang H F, Zhang J G, Zhou H W. The temporal and spatial fluctuation of the groundwater level along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 53-62.
- [14] Lei J Q, Li S Y, Jin Z Z, Fan J L, Wang H F, Fan D D, Zhou H W, Gu F, Qiu Y Z, Xu B. Comprehensive eco-environmental effects of the shelter-forest ecological engineering along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S2): 190-202.
- [15] Jiao P X. Formation and distribution of groundwater and its conditions for development and utilization in Taklimakan desert. Groundwater, 1995, 17(3): 97-101.
- [16] Fan J L, Xu X W, Lei J Q, Zhao J F, Wang L H. Measuring the velocity and direction of groundwater along Tarim Desert Highway. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(8): 51-55.
- [17] Lawrence N D, Platt J C, Jordan M I. Extensions of the informative vector machine // Winkler J, Niranjana M, Lawrence N, eds. Deterministic and Statistical Methods in Machine Learning. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 56-87.
- [18] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.
- [19] Rhoades J D. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids // Sparks D L, Page A L, Helmke P A, Loeppert R H, Soltanpour P N, Tabatabai M A, Sumner M E, eds. Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. Madison: American Society of Agronomy, 1996: 417-435.

参考文献:

- [6] 宋松柏, 蔡焕杰. 区域水资源可持续利用评价的人工神经网络模型. 农业工程学报, 2004, 20(6): 89-92.
- [7] 胡铁松, 袁鹏, 丁晶. 人工神经网络在水文水资源中的应用. 水科学进展, 1995, 5(1): 76-82.
- [10] 王秀美, 高新波, 李洁. 一种基于高斯隐变量模型的分类算法. 计算机学报, 2012, 35(12): 2661-2667.
- [15] 焦培新. 塔克拉玛干沙漠地下水形成分布规律及其开发利用条件. 地下水, 1995, 17(3): 97-101.
- [16] 范敬龙, 徐新文, 雷加强, 赵景峰, 王鲁海. 塔里木沙漠公路沿线地下水流速流向测定. 工程勘察, 2009, 37(8): 51-55.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguo, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar, nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元