

白洋淀湿地生态系统水分条件遥感监测方法

沈 欣¹, 欧阳志云^{1,*}, 段晓男¹, Jan de leeuw²

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室; 2. 荷兰国际地理信息科学与地球观测学院)

摘要: 湿地水文条件对湿地生态系统结构和功能起到关键作用。利用遥感获取与湿地水分条件直接相关的生物物理变量, 包括归一化植被指数 (NDVI) 和地表温度, 探讨监测湿地挺水植物缺水状况的可能性, 并探讨了建立湿地水分遥感监测的新方法。回归分析表明, 对于同一挺水植物而言, 在湿地旱化的条件下, 由于植物的蒸腾作用的差异, 在植被生长状况 (NDVI) 相同的情况下, 地势较高处植物的冠层温度亦较高; 在生长处高度相同的情况下, 植被覆盖度高 (NDVI 值高) 的地方, 植物的冠层温度较低。这说明可以通过地表温度和 NDVI 来监测挺水植物的缺水程度。

关键词: 湿地; 遥感; 水分条件; 缺水程度

文章编号: 1000-0933(2008)10-5033-06 中图分类号: Q148, Q149 文献标识码: A

Inferring Baiyangdian wetland soil moisture from remote sensing: method research

SHEN Xin¹, OUYANG Zhi-Yun^{1,*}, DUAN Xiao-Nan¹, Jan de Leeuw²

1 State Key Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, The Netherlands

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5033 ~ 5038.

Abstract: For the conservation and management of wetland resources, it is important to monitor wetlands on a regular basis. For these purposes remote sensing can be used as a powerful tool with several advantages. Continuous reduction of water level in wetlands is one of the main reasons that lead to the loss of many wetlands worldwide. To protect and provide proper management, there are many remote sensing based methods being used. Other than the most classical method i. e. land cover change detection, a new approach was investigated. The possibility of estimating the hydrological condition of emergent vegetation of a wetland area was explored with the help of remotely sensed biophysical variables, such as surface temperature and NDVI. Based on these two biophysical variables, a digital elevation model was derived from multispectral data set. An attempt was made to explore the relations among these variables in statistical analysis, where elevation and NDVI were used as an explanatory and temperature was used as a dependant variable. Using three regression models, a relationship between surface temperature and water stress was established. It was observed that the same vegetation cover at higher elevation area had a higher surface temperature because of water stress, while at the same elevation higher NDVI resulted in lower surface temperatures. The combination of elevation (water level) and NDVI determine the surface temperature, which suggests that temperature and NDVI reflect the water stress of the emergent vegetation.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 (2006CB403402)

收稿日期: 2007-06-01; **修订日期:** 2008-04-09

作者简介: 沈欣 (1977 ~), 北京市人, 硕士, 主要从事湿地遥感监测研究. E-mail: shen@itc.nl

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@cees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Program of China (No. 2006CB403402)

Received date: 2007-06-01; **Accepted date:** 2008-04-09

Biography: SHEN Xin, Master, mainly engaged in carbon cycle of grassland. E-mail: shen@itc.nl

Key Words: wetland; remote sensing; water stress; soil moisture

全球范围内湿地生态系统的退化,甚至消亡的趋势日趋严重。其中人类活动造成的湿地水位下降甚至枯竭,是全球湿地大面积减少的主要原因之一^[1],我国海河流域也面临这样的困境。水资源过度开发和不适当的土地开垦,导致目前湿地面积仅仅为 20 世纪 50 年代的 1/3^[2]。并且现有湿地如白洋淀等依然面临水位下降、面积减少的危险。

水文条件对湿地的发育演化和湿地生态系统的维持有着重要意义。水文条件的不断变化,不仅仅改变湿地的分布面积和形态,而且对植物群落的结构、分布乃至湿地生态系统服务功能起着决定性的作用。因此对湿地水文条件进行动态监测是湿地管理和保护的基础。

湿地水文状况的主要监测指标包括入水量、出水量和水位高度,尤其是地表水位和地下水位^[2]。目前针对湿地水文条件的监测大多是定点观测。由于湿地是一个复杂的生态系统,水文条件存在空间差异性。有限的观测点得到的不连续数据不能完全反映整个湿地水文在空间和时间尺度上的变化特征,这些监测数据不能全面支撑湿地生态系统对水文条件变化的响应研究。

遥感技术已经成为湿地植物群落监测技术之一。一方面可以通过遥感影像光谱进行直接判读和分类,但是单纯凭借遥感航片解译的植物区和实际分布有时存在显著的偏差^[3];另一种方式是通过生物、物理、化学因子的分析,如计算植物生物量的 NDVI 指数,蒸发的 SEBAL 指数^[4]等。

鉴于 NOAA 的热波段和通过 NDVI 得到的植物群落分布区域存在相关性^[3],本文通过利用遥感获取与湿地水分条件直接相关的生物和物理变量,包括 NDVI 指数和地表温度,进而分析湿地挺水植物缺水状况监测的可能性。在此基础上,运用回归模型的反函数推测裸露程度,探讨湿地生态系统水文监测的方法。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

白洋淀(东经 115°4' 54.87" ~ 116°7' 50.23", 北纬 38°46' 06.95" ~ 38°59' 04.12"), 位于我国河北省中部。淀区由 143 个大小不等的淀泊和 3700 多条沟壕组成,沟叉河道纵横交错,地形复杂。总面积达 362.8 km²,其中 66.7 km² 生长着芦苇,3.3 km² 为农田^[3]。

受到人为和自然两方面因素的影响,几十年来白洋淀湿地水文特征发生了明显的变化,主要表现在入淀水量减少、水位降低、蒸发量增加等^[5~7]。淀区补水以地表径流为主,水量大小主要取决于当年的气候条件。由于地处暖温带半湿润大陆季风气候区,降雨年内分配很不均匀,历史上淀区水位随季节变化,在夏季汛期过后达到一年中最高水位。但是从 20 世纪 50 年代起,由于在上游陆续修建水库,气候亦日渐干燥,使得入水量减少。目前,靠自然补给不能维持淀区的正常水位。自 1992 年以来,靠上游各大小水库大量补水来摆脱干淀的威胁。而水位的变化规律也随之而改变。水位高度取决于补水量的大小。

芦苇(*Phragmites australis*), 蒲草(*Typha* ssp.) 和荆三棱(*Scirpus* ssp.) 是淀区最主要的挺水植物类型。其中芦苇的分布占有绝对优势。在浮叶植物中,荷花(*Nelumbo nucifera*), 芡实(*Euryla ferox*) 和菱角(*Trapa natans*) 为常见植物类型。

1.2 研究方法

以遥感为手段获取淀底高程、NDVI、地表温度、植被分布等空间信息。采用多元线性回归分析、通用回归分析等不同结构得到以 NDVI 和裸露程度(定义植物生长处到开放水面的垂直距离为裸露程度,以 ED 表示,见图 1)为自变量,地表温度为因变量的回归模型。验证就同一挺水植物而言,在植被生长状况(NDVI)相同的情况下,由于植物的蒸腾作用强弱不同,地势较高处的冠层温度亦较高的研究假设。对所有的回归分析分别计算了回归系数、决定系数(R^2),进行 T 检验和 F 检验。并进一步使用上述回归模型的反函数推测裸露程度,对由遥感获得的地表温度、NDVI 等生物物理变量反演裸露程度,从而监测湿地挺水植物生长的水分条件。

由遥感影像提取淀区的空间信息部分的具体做法是:对多时相美国陆地卫星影像进行分类,以生成的水

域边界为等高线,对其插值生成淀底高程;利用 ASTER 小组研究出的温度-辐射率分离函数^[8],由 ASTER 影像的热红外波段反演出地表温度;由 ASTER 影像的可见光-近红外波段计算出 NDVI,并通过最大似然法监督分类识别芦苇的分布区域。

2 结果和讨论

2.1 回归方程

由遥感影像获取的不同分辨率的栅格信息通过 ERDAS 的退化功能被重新采样到 90m,经 ILWIS 的交叉功能,生成 1089 个分析样本,样本的基本统计信息见表 1。以这些样本为样本集,选用不同结构的模型,通过回归分析,得到 3 个方程,分别为:

模型 1

$$T = 28.590 \times ED + 0.477 \times ED - 13.287 \times NDVI \quad (1)$$

模型 2

$$T = 26.686 - 3.322 \times NDVI + 1.817 \times ED - 7.006 \times NDVI \times ED \quad (2)$$

模型 3

$$T = 26.395 + 2.545 \times ED - 4.668 \times ED - 4.668 \times NDVI \times ED - 21.362 \times NDVI^2 - 0.482 \times ED^2 \quad (3)$$

3 个回归模型都有较好的模拟效果($P < 0.01$,表 2),根据 T 检验,裸露程度、NDVI 以及它们的交叉项、二次项都具有预测地表温度的有用信息,各个回归方程都不同程度的解释了地表温度的变化与 NDVI 以及裸露程度之间的关系。

表 1 样本集各变量的基本统计信息

Table 1 Stastics information of variations

项目 Item	N	最大 Minimum	最小 Maximum	平均 Mean	标准差 Standard Deviation
NDVI	1089	0.0363	0.3061	0.2069	0.0431
裸露程度 h (m)	1089	-0.4281	2.3259	1.3982	0.6360
地表温度 T (°C)	1089	24.8882	31.8512	26.5080	0.9711

对 3 种模型分别进行回归分析都表明,地表温度和裸露程度之间有着极显著的相关性。模型 1 中,当裸露程度增加时,地表温度随之上升。模型 2 中,如果 NDVI 值小于 0.26,裸露程度增加时,地表温度也随之上升。模型 3 中,当 NDVI 和裸露程度在阈值线($ED = 2.640 - 4.842 \times NDVI$)以下,裸露程度增加时,地表温度也随之上升。从这一点来看,所有的模型验证了同一个观点,那就是裸露程度高的植被,即生长在较高地势处的植被,有着较高的地表温度,也就预示着此处有更严重的缺水状况。

2.2 最适模型

在包含裸露程度、NDVI 和由它们组成的交叉项、二次项的 3 个回归模型中,模型 3 最合适。首先,它的决定系数 R^2 最高,意味着回归方程有更好的拟合度。在估计标准误差减小的同时,模型 3 解释了 51.5% 的样本值的变化。所以基于这个样本集,它有着最强的解释力。

其次,模型 3 中反映的当 NDVI 增加时,地表温度

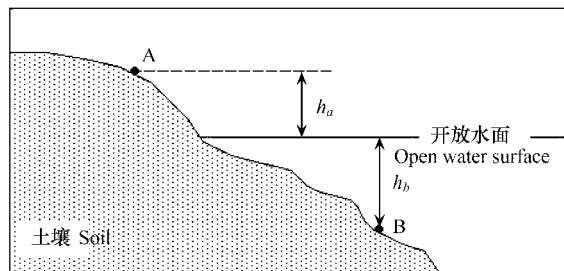


图 1 地表裸露程度计算方法示意图

Fig. 1 Sketch of calculate method of land bareness

用 h_a 表示 A 处的裸露程度,即该处海拔高度与开放水面水位值的差值,由于 A 处高于水面高度, h_a 为正值;同样用 h_b 表示 B 处的裸露程度,由于 B 处低于水面高度, h_b 为负值 $h_a = \text{bareness at A}$, i.e, the difference between attitude of A and water level of open water; If A is above the water surface, h_a is positive; In the same way, h_b is the bareness of B; Since B is below the water surface, the h_b is negative

表 2 3 种不同结构回归分析的结果

Table 2 Results of three different structure analysis

模型 Model	F	df	P	R^2
1	421.255	2, 1086	< 0.001	0.437
2	318.764	3. 1085	<0.001	0.468
3	287.267	4, 1084	<0.001	0.515

对裸露程度的变化率减小这一情况是合乎情理的。当 *NDVI* 增加时,植被覆盖度更大,群落的根系更发达。而根系发达的植被较根系不发达的植被对裸露程度的变化是较不敏感的。

最后,模型 3 中所描述的这种“地表温度对裸露程度的变化率随裸露程度本身的增加而减少”也是合理的。如果植被缺水状况主要因地势高低而异,那么在裸露程度高的地方生长的植被缺水更严重。因而在植被生长状况相似的情况下,在裸露程度高的地方其变化引起的蒸散总量的变化量小于在裸露程度低的地方,进而地表温度的变化在裸露程度低处,即低地势处更大。

2.3 负增长率

用一个简单的回归模型来描述自然界变量间的复杂关系,其本身是做到对一定范围内一定情况下变量间关系的一种抽象。本文中得到的模型 2 和模型 3,尽管它们可以较好的说明样本集中地表温度的变化与 *NDVI* 和裸露程度这两个因素间的关系,但是也出现了部分区间内地表温度和裸露程度存在负增长率关系。

这种负增长率是有悖常理的。这里提出了如下的假想:对应这部分负增长率所在的自变量范围,是生长旺盛的芦苇群落。对于它们来说,由于根系已经极为发达,因而裸露程度的微小变化对它们的蒸腾作用的影响很小,其冠层温度也没有变化。

为了验证这种假想,将整个样本集根据 *NDVI* 值的大小分组(原样本集被分为 5 组,*NDVI* > 0.259 的为 1 组,其余的平均分为 4 组),对每一个子样本集使用公式 4 和公式 5 的模型分别进行了新的线性回归分析。

$$T = a + b \times ED \quad (4)$$

$$T = a + b \times ED + c \times DIST \quad (5)$$

式中,*ED* 为植物的裸露程度;*Dist* 为植物生长处到开放水域的距离。

其中公式 5 表达的同样是植物缺水状况与地表温度间的关系,认为植物缺水状况与植物生长处距开阔水域的垂直和水平距离成正比。考虑到在大量降雨的季节来临之前,连续的植物蒸腾作用和土壤水分的直接蒸发使远离开水域处湿地的地下水水位下降,直至接近整个地区的地下水位,地下水位在距开阔水域远近不同处会有所区别。

回归分析的结果(表 3)验证了本文的假想。在 *NDVI* 低的组回归系数明显不为零,在 *NDVI* 高的组,回归系数与 0 没有本质差别。使用公式 4 时,裸露程度作为解释地表温度变化的自变量只在前 3 个子样本集中有统计学意义。对于第 4 组和第 5 组来说,取 0.05 的置信度时,裸露程度是对地表温度变化没有解释能力的。特别是第 5 组,有 54.9% 的可能性裸露程度是与地表温度变化无关的。使用公式 5 的模型时,植物缺水状况与地表温度之间的相关关系更好(决定系数与同组只以 *ED* 为自变量的回归模型相比分别增加了)。但在第 5 组中同样出现裸露程度和水平距离对地表温度没有明显影响($P_{ED} = 0.520$, $P_{DIST} = 0.605$)的情况。

2.4 反演裸露程度

本研究通过回归分析验证了研究假设,即在水分因子为限制因子的情况下,挺水植物群落分布区域的裸露程度和 *NDVI* 为决定地表温度的主要因素;裸露

程度越高,蒸散作用越弱,地表温度越高。利用这一关系,找到遥感监测湿地水分条件的新方法,即由遥感测得的地表温度和 *NDVI* 来推测挺水植物的裸露程度或缺水状况。根据这个思路对白洋淀地区进行了具体的

表 3 对五个样本子集进行两组线性回归的结果

Table 3 Regression results to five sample sets

子样本集	自变量	R^2	F 检验 P	T 检验 P
<i>NDVI</i> -1 (0.036 ~ 0.173)	ED	0.207	0.000	0.000
	ED	0.213	0.000	0.000
	DIST			0.000
<i>NDVI</i> -2 (0.173 ~ 0.202)	ED	0.328	0.000	0.000
	ED	0.347	0.000	0.000
	DIST			0.021
<i>NDVI</i> -3 (0.202 ~ 0.221)	ED	0.071	0.000	0.000
	ED	0.131	0.000	0.000
	DIST			0.000
<i>NDVI</i> -4 (0.221 ~ 0.259)	ED	0.005	0.184	0.184
	ED	0.160	0.000	0.122
	DIST			0.000
<i>NDVI</i> -5 (0.259 ~ 0.306)	ED	0.040	0.549	0.549
	ED	0.060	0.731	0.520
	DIST			0.605

研究。

由 2003 年 5 月 25 日的 ASTER 影像提取的数据,将样本随机分成两组,进行分析(由于生长在水中的芦苇不存在模型所反映的缺水程度与地表温度之间的关系,所以原样本集中 7 个水中的样本不予考虑)。对第一组数据进行前述的回归分析,并求其反函数,再将该反函数应用于第二组样本计算裸露程度,并与由淀底高程计算的裸露程度进行比较。

将模型 1 结构的回归模型应用于第一组样本,确定各回归系数,进而求得用于估计裸露程度的反函数模型 1'。再将第二组各样本的地表温度和 *NDVI* 值带入模型 1',可得相对应裸露程度的估计值 ED_p 。

同理可求得模型 2',尽管模型 2' 是一个单值函数,但是 *ED* 的取值不稳定。在样本所在的变量 *T* 和 *NDVI* 的变化范围内,它们的轻微变化会导致 *ED* 取值的极大变化。建议寻找具有类似形状的其他函数,来代替此函数,以避免上述情况的发生。

模型 3 关于 *ED* 的反函数是一个 2 值函数,但其在 $ED < 2.640 - 4.842 \times NDVI$ 时,即吻合研究假设的区域,为单值函数,并且这一区域内关于 *ED* 的反函数取值稳定。考虑到与模型 1、模型 2 相比模型 3 对地表温度变化与 *NDVI* 和 *ED* 两因素间关系有更强的解释能力及前述情况,本研究采用如下的方法生成估计裸露程度的函数。

在 *ED* 和 *NDVI* 的取值范围内随机生成 1000 个样本基点(同时满足 $ED < 2.640 - 4.842 \times NDVI$,保证变量间的一一对应关系),根据模型 3 的公式,对这些基点赋予地表温度值,生成具有模型所描述的变量关系的模拟样本。再以 *NDVI* 和地表温度为自变量,*ED* 为因变量进行多项式回归,求出模型 3' 的近似计算公式。近似函数选用了二次多项式形式,亦可以采用更高次的多项式,会有更好的近似效果。将该反函数应用于第二组样本计算裸露程度。

通常从量化的角度,一个模型的好坏可以通过预测量和观测量进行回归的结果以及绝对平均误差进行评价。使用的回归模型及误差计算公式如下,其中 X_o 为观测变量,对应本研究中由淀底高程计算的裸露程度 *ED*, X_p 为模型预测变量,对应本研究中由反函数估计得出的裸露程度 ED_p , $\hat{X}_p$ 为预测变量的回归变量。

$$\hat{X}_p = \lambda X_o \quad (6)$$

$$\hat{X}_p = a_1 + \lambda_1 X_o \quad (7)$$

$$E_r = |1 - \lambda| \times 100$$

$$E_a = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{oi} - X_{pi}|}{X_{ok}}$$

依据上述方法对模型 1' 和模型 3' 进行评价,得到各个参数值。模型 1' 的预测变量相对于观测变量是基本无偏差的($\lambda = 1.029, \lambda_1 = 0.999, a_1 = 0.051$)。从总体的趋势看,预测变量相对于观测变量有 2.9% 的预测偏差($E_r = 2.9$)。就每一对观测值与预测值的比较而言,即绝对误差的分布可知,中位数为 0.65,有一半的预测值与观测值相比其误差小于观测值的 65%,但整体的平均绝对误差甚大,为观测值的 143% ($E_a = 143$)。从总体的趋势看,模型 3' 低估了裸露程度(λ, λ_1 小于 1),预测变量相对于观测变量有 10% 的预测偏差($E_r = 10$),较使用模型 1' 时大。但就每一对观测值与预测值的比较而言,平均绝对误差是使用模型 1' 时的一半,为观测值的 71.9% ($E_a = 71.9$)。进一步比较两预测模型绝对误差的分布(图 2)可知 Model 3' 有更好的预测效果。在两预测模型的绝对误差都呈现出误差增大时样本数迅速递减的分布趋势下,模型 3' 的误差在小的—端更集中,有一半样本的预测值与观测值相比绝对误差小于观测值的 52.4% (图 2)。

3 讨论

就同一挺水植物而言,由于植物的蒸腾作用强弱不同,在植被生长状况(*NDVI*)相同的情况下,地势较高处植物的冠层温度亦较高;在生长处高度相同的情况下,植被覆盖度高(*NDVI* 值高)的地方,植物的冠层温度较低。这与用于监测干旱程度的条件温度植被指数(VTCI)^[9]所依托的“干燥的裸土、水体、最大蒸腾状态的植被 3 种典型情况在 *NDVI* 和地表温度特征空间中构成三角形关系”的理论假设相符合。两者都考虑了区域

内 *NDVI* 的变化和土壤水分变化对地表温度的影响。不同之处在于,本研究中直接使用裸露程度作为干旱程度的指示因子。

对地表温度与裸露程度和 *NDVI* 两变量之间关系的具体描述在 3 个回归模型中略有不同,其中模型 2 和模型 3 都描述了随着 *NDVI* 增大,裸露程度变化所带来的地表温度变化逐渐减小这一现象,这也与条件温度植被指数所考虑的随着 *NDVI* 的增大,干旱程度变化所带来的地表温度变化逐渐减小这一现象相吻合。本研究认为模型 3 是三者中的最适模型。

裸露程度和 *NDVI* 是决定地表温度的主要因素,这意味着可以通过地表温度和 *NDVI* 来监测挺水植物(芦苇)的缺水程度。研究中只是尝试了几种可能被用于监测湿地水分条件的预测模型。尽管预测结果存在一定的预测误差,但是预测变量与观测变量间的相关关系都是极显著的。

由于没有大量的实测数据,无法进行回归分析和检验。对湿地植物缺水程度的描述只选择了裸露程度这一指标,未考虑湿地植物生长处距开放水域水平距离的影响;回归模型只局限于多项式形式。通过实测数据的支持,得到更详细参数的确定和修改,提高方法的精度和预测效果。

References:

- [1] Dugan P. Mitchell Beazley Ltd., and International Union for Conservation of Nature and Natural Resources., Wetlands in danger: a world conservation atlas. New York: Oxford University Press, 1993.
- [2] Guo L F, Guo Y, Yu H. Current situation of wetlands in the Haihe Basin and its administration countermeasures. *Haihe River Resources*, 2005, 5:10—13.
- [3] Chen J H, Kan C E, *et al.* Use of spectral information for wetland evapotranspiration assessment. *Agriculture Water Management*, 2002, 55: 239—248.
- [4] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 2000, 229:87—100.
- [5] Meng X M, Wu L L, Zhai B G. Management and Study Methods of Wetland. Beijing: Chinese Forestry Press, 2001.
- [6] Local Editor Commission of Anxin. county annals of Anxin. Beijing: Xinhua Publishing House, 2000.
- [7] Li Y H, Cui B S, Yang Z F. Influence of hydrological characteristic change of Baiyangdian on the ecological environment in wetland. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(1): 62—68.
- [8] Gillespie A. *et al.* A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1113—1126.
- [9] Wang P X, Wang Z M, Gong J Y. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(8): 527—533.

参考文献:

- [2] 郭丽峰,郭勇,于卉. 海河流域湿地现状及治理对策. *海河水利*, 2005, 5:10~13.
- [5] 孟宪民,武立磊,翟保国. 湿地管理与研究方法. 北京:中国林业出版社, 2001.
- [6] 安新县地方志编纂委员会. 安新县志. 北京:新华出版社, 2000.
- [7] 李英华,崔保山,杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 62~68.
- [9] 王鹏新, W. Zheng-ming, 龚健雅. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003, 18(8): 527~533.

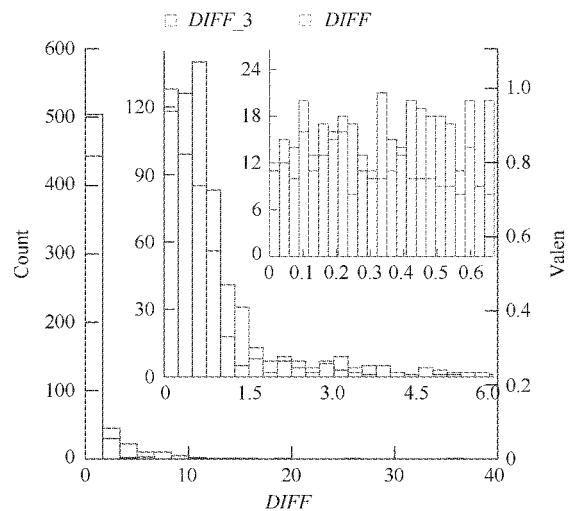


图2 模型1'和模型3'预测绝对误差分布图

Fig. 2 Distribution of absolute error of Model 1' and 3'

DIFF 为使用 Model 1' 时,每一样本的绝对预测误差;*DIFF_3* 为使用 Model 3' 时,每一样本的绝对预测误差 *DIFF* and *DIFF_3* was the absolute prediction error of each sample of Model 1' and 3', respectively