

白鹤中途停歇地主要食物蘆草球茎密度的空间插值方法研究

刘春悦^① 江红星^{①②*} 孙效维^③ 邹畅林^③ 王波^③ 钱法文^② 吕宪国^①

① 中国科学院东北地理与农业生态研究所 长春 130012;

② 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林保护学重点实验室 北京 100091;

③ 吉林莫莫格国家级自然保护区管理局 镇赉 137000

摘要: 扁秆蘆草 (*Scirpus planiculmis*) 和三江蘆草 (*S. nipponicus*) 的球茎是迁徙白鹤 (*Grus leucogeranus*) 在莫莫格中途停歇地的主要食物。2010年9月15~25日,对莫莫格白鹤集中停歇地鹅头泡湿地的20条样线上100 m等间隔470个取样点进行了地下0~20 cm的蘆草球茎的取样工作。基于此,采用反距离权重、4种径向基函数和普通克里格共6种空间插值方法模拟了该区域蘆草球茎密度。交叉验证和插值结果的空间分布图对比,径向基函数中的张力样条插值效果最佳,是最适于该区域挺水植物蘆草球茎密度的空间插值方法。张力样条插值结果表明:研究区内蘆草球茎密度均值为(46.0 ± 44.3)个/m²。其中,<25个/m²的面积占研究区的41.7%,25~100个/m²的面积占45.9%,而>100个/m²的面积仅占12.4%。研究结果为下一步分析白鹤迁徙种群与环境因子的生态关系、预测该地区白鹤的环境容纳量提供十分重要的基础数据。

关键词: 莫莫格鹅头泡湿地;白鹤;蘆草球茎;空间插值;张力样条

中图分类号:Q958 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2013)03-382-09

Comparison of the Spatial Interpolation Methods for the Tuber Density of Two *Scirpus* Species: Main Food of Siberian Cranes at the Stopover Site

LIU Chun-Yue^① JIANG Hong-Xing^{①②*} SUN Xiao-Wei^③ ZHOU Chang-Lin^③ WANG Bo^③
QIAN Fa-Wen^② LÜ Xian-Guo^①

① Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012;

② Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Key Laboratory of Forest Protection of State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;

③ Momoge National Nature Reserve of Jilin, Zhenlai 137000, China

Abstract: The tubers of *Scirpus planiculmis* and *S. nipponicus* are the main food for migratory Siberian Cranes *Grus leucogeranus* at the Momoge National Natural Reserve (MNNR) of Jilin Province, Northeastern China. During 15 – 25 September 2010, we sampled tubers of these two species at 470 points evenly distributed at 100 m intervals along 20 transect lines at Etoupao wetland, the area of the highest concentration of migratory

基金项目 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所所长基金项目(No. CAFRIFEEP201001);

* 通讯作者, E-mail: hxjiang@caf.ac.cn;

第一作者介绍 刘春悦,女,助理研究员;研究方向:地图学与地理信息系统;E-mail: liuchunyuecas@163.com。

收稿日期:2012-10-23,修回日期:2013-01-05

Siberian cranes at MNRR. Six different methods of spatial interpolation including inverse distance weighting (IDW), four radial basis functions (RBF) and ordinary kriging (OK) were employed to simulate the *Scirpus* tuber density in the study area based on the field sampling data. According to the results of the cross-validation and spatial distribution, the spline with tension of RBF is the most optimized method with the highest accuracy. The results of this method showed that the mean tuber density was 46.0 ± 44.3 no./m². Areas with tuber densities < 25, 25 - 100, and > 100 /m² occupied 41.7%, 45.9% and 12.4% of the study area, respectively. The results provide basic, yet critical, data for determining the relationship between Siberian cranes and tuber availability, and predicting the environmental capacity of Etoupao wetland for supporting migratory Siberian cranes.

Key words: Etoupao wetland of Momoge; Siberian Crane (*Grus leucogeranus*); *Scirpus* tuber; Spatial interpolation; Spline with tension

白鹤 (*Grus leucogeranus*) 是世界上 15 种鹤类中最濒危的三种鹤类之一, 种群数量为 3 500 ~ 4 000 只, 其中东部种群占世界种群的 99% (BirdLife International 2012)。白鹤的东部迁徙路线上, 黑龙江扎龙湿地和吉林莫莫格湿地均是其重要的中途停歇地 (王里等 1989, 李方满 1997, 何春光等 2002, Kanai et al. 2002, 黄方等 2007)。中途停歇地对于候鸟补充能量以顺利完成迁徙并在繁殖地成功繁殖至关重要 (马志军等 2005)。20 世纪 80 年代末, 扎龙湿地白鹤迁徙种群数量维持在 1 000 只左右。进入 21 世纪以来, 由于湿地缺水, 种群数量急剧减少到目前的不足 500 只 (黄方等 2007)。2007 ~ 2010 年, 莫莫格保护区鹅头泡湿地中白鹤迁徙种群日最高统计数由 1 156 只 (邹畅林等 2008) 增长到 3 128 只 (江红星 2010), 春秋停歇时间分别延长到近 2 个月 (江红星 2010)。白鹤是特定依赖浅水湿地生存的三种鹤类之一 (Meine et al. 1996, BirdLife International 2012)。在越冬地, 以沉水植物苦草 (*Vallisneria spiralis*) 的块茎为主要食物 (Wu et al. 2009, 孙志勇等 2010)。在莫莫格鹅头泡地区, 白鹤春秋迁徙季节主要以扁秆蘆草 (*Scirpus planiculmis*) 和三江蘆草 (*S. nipponicus*) 的地下球茎为主要食物 (惠淑荣等 2009)。以往关注白鹤食源植物的研究主要涉及繁育特性、生态特性 (郑志华 2008) 与土壤含盐量之间关系 (惠淑荣等 2009) 等方面, 对蘆草球茎空间密度分布特征的研究尚未开展。

空间插值是地理信息系统空间分析技术重要组成部分, 该方法可以用已知点的属性合理推断和预测附近未知点的属性值 (汤国安等 2006)。空间插值是研究区域变量空间分布的重要方法, 目前广泛应用于地形 (Bater et al. 2009)、降水 (蔡福等 2006)、土壤 (林啸等 2007, 陈光等 2008) 等诸多领域。然而用于湿地挺水植物地下生物量的研究鲜有报道。

空间插值包括几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法、随机模拟方法、物理模型模拟方法和综合方法 (李新等 2000)。空间插值依据已知点和已知区域数据的不同分为点的插值和面的插值 (黄杏元等 2001, 潘志强等 2002)。其中, 点的插值方法分为基于整体的插值方法和基于点的插值方法。通常空间插值的精度受到采样间隔、数量及插值方法等因素的影响。选择适当的插值方法对提高空间插值的精度至关重要。插值方法的筛选、条件的优化已经成为空间插值技术在各领域应用研究的热点 (林琳等 2007)。目前比较常用的是反距离权重插值法 (inverse distance weighting, IDW)、径向基函数插值法 (radial basis functions) 和克里格插值法 (kriging)。ArcGIS 空间分析 (spatial analysis) 模块及地统计分析 (geostatistical analysis) 模块为复杂的空间插值方法提供友好的可视化界面。

为准确估测白鹤重要中途停歇地莫莫格保护区鹅头泡湿地中两种蘆草球茎的密度, 2010 年 9 月 15 ~ 25 日, 对该区域 20 条样线上 470 个

取样点进行了蘆草地下 0~20 cm 的球茎取样工作。基于此,采用反距离权重插值、径向基函数中的 4 种插值方法和普通克里格插值方法等 6 种空间插值方法模拟了该区域蘆草地下球茎密度。依据插值结果和验证参数比较,选择了最优的插值方法,并进一步分析该区域蘆草地下球茎的空间分布特征。研究结果为探索湿地挺水植物地下球茎的空间插值优化方法提供重要参考,并为下一步研究蘆草地下球茎生物量、分析白鹤与环境因子的生态关系、预测该地区白鹤的环境容纳量提供十分重要的基础数据。

1 材料与方 法

1.1 研究区 研究区位于吉林莫莫格国家级自然保护区鹅头泡地区(E123°36′14″~E123°45′15″,N45°56′31″~N45°52′13″),面积约为 5 000 hm²(图 1)。历史上,白鹤在莫莫格地区主要停歇在白音套海、后各力吐、三门王家、咕噜台等地(图 1b 中的 I, II, III, IV)(王里等 1989,何春光等 2002,邹畅林等 2008)。近几年来,由于农田退水,咕噜台湿地植被以芦苇(*Phragmites australis*)和蒲草(*Typha angustifolia*)为主;其他地点由于干旱,蘆草逐渐被虎尾草(*Chloris virgata*)等植被演替,不再适宜白鹤中途停歇。自 2006 年以来,鹅头泡湿地缺水,芦苇为优势种的植被类型,逐渐演替为扁干蘆草和三江蘆草。自 2007 年春季以来,白鹤迁徙种群主要利用该区域湿地(图 1c)(邹畅林等 2008)。截止目前,鹅头泡湿地白鹤日最高迁徙数量已占世界种群数量的 95%(江红星 2010)。

1.2 数据来源与野外采样 从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站(<http://glovis.usgs.gov/>)下载该地区 2010 年 9 月 12 日 Landsat-7 ETM+ 和 2010 年 7 月 2 日 Landsat-5 TM 遥感影像。在 ENVI 4.8 环境下,对两景影像进行影像到影像(image to image)的几何纠正,全部采样成 30 m × 30 m。Landsat-7 ETM+ 保留 Band 1~5、7 六个波段,以 Landsat-5 TM 的同波段影像对其黑色条带进

行掩膜(mask)替换处理,截取研究区范围(图 1b V)。采用分类树(decision tree)对 2010 年 9 月 12 日影像进行分类,提取鹅头泡区域主要湿地,面积为 1 941 hm²(图 1c 中的灰色区域)。

利用 ArcGIS 9.2 软件 ArcToolbox 中的 Creating Fishnet 工具,对鹅头泡区域设置南北方向 20 条样线,每条样线间隔 400 m。对于每一条样线,每间隔 100 m 设置一个取样点(图 1c)。将取样点的经纬度数据输入手持 Garmin 60CSX GPS 用于导航。2010 年 9 月 15~25 日,在秋季白鹤迁到之前,对每个取样点利用取样器(10 cm × 10 cm),于 1 m × 1 m 范围内随机采集 4 个地表下 0~20 cm 土壤中的蘆草球茎。

短秆蘆草和三江蘆草的主要形态鉴定特征为前者花序顶生或侧生兼有,而后者花序为假侧生;两者地下球茎形态非常相似(傅沛云 1995)。兼顾两种蘆草球茎均为白鹤的主要食物,野外取样过程中未将其球茎分开处理。实际操作过程中,以 4 个样方的算术平均值作为该样点 30 m × 30 m 栅格的蘆草球茎的密度值。鉴于白鹤的喙长为(16.8 ± 1.6) cm($n=8$),假定白鹤仅能取食地表以下 20 cm 以上的蘆草球茎。

1.3 数据处理 为了消除离群值对空间插值产生的负面影响,采用频率分布直方图的方法识别全局离群值,并予以剔除,最终确定参与蘆草密度空间插值的样本点为 428 个。通过 ArcGIS 正态 QQ 图检验,研究区样本点符合正态分布,直接采用原始蘆草密度数据空间插值。

1.4 插值方法及结果验证 基于采样点的整体插值方法,不能提供内插区域的局部特性,结果具有粗略性特点;而基于采用邻近于未知点的采样点的特征值来估算未知点特征值的局部插值方法,可以提供内插区域内的局部特性,且不受其他区域的内插影响,结果具有精确性特点(朱求安等 2004)。因此,本研究选择基于采样点的局部插值方法。

鉴于本研究采样点分布均匀、样本量大,结合不同局部插值方法的特点(李新等 2000,朱

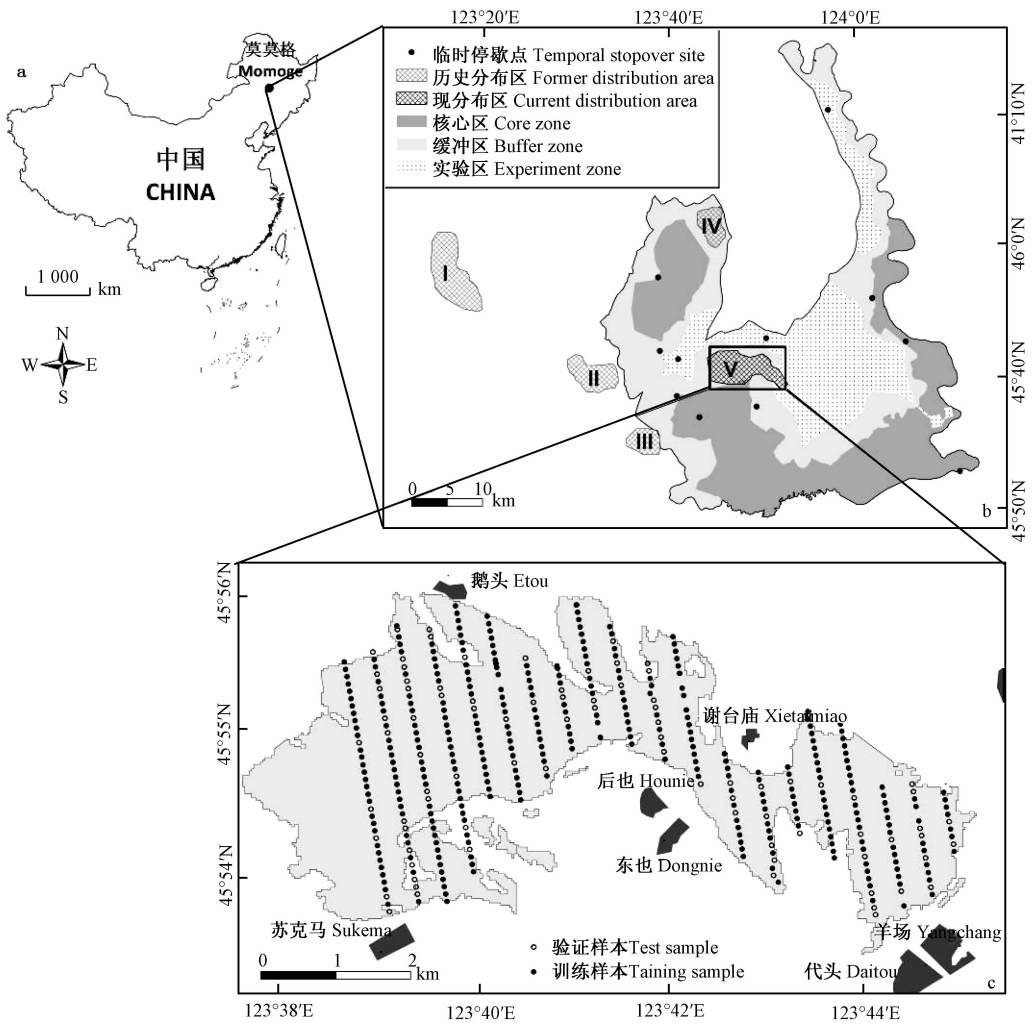


图 1 鹅头泡湿地研究区

Fig. 1 Location of the study area

a. 莫莫格保护区在中国的位置; b. 鹅头泡湿地在莫莫格保护区的位置; c. 研究区在鹅头泡湿地中的位置。图 1b 中的 I, II, III, IV 分别为白音套海、后各力吐、三门王家和咕噜台湿地, 均为白鹤在该地区的历史停歇地; 图 1b 中的 V 为鹅头泡湿地, 是白鹤 2007 年以来的集中停歇地。图 1c 中灰色区域为研究区范围, 黑色圆圈为蔗草密度训练样本取样点, 空心圆圈为蔗草密度验证样本取样点。

a. Location of Momoge National Nature Reserve (NNR) in China; b. Location of the Etoupao wetland in the Momoge NNR; c. Location of the study area in the Etoupao Wetland. The codes I, II, III, and IV in the figure 1b refer to the wetland of Baiyintaohai, Hougelitu, Sanmenwangjia and Gulutai, respectively, where are the former stopover sites by the Siberian Crane. The code V in the figure 1b is the Etoupao Wetland, where is the most concentration stopover site of the Siberian Crane since 2007. The grey area in the figure 1c indicates the study area, black circles show training sampling points and empty circles present test sampling points for tuber density.

求安等 2004, Li et al. 2008), 选择反距离加权插值法 (inverse distance weight, IDW)、径向基函数插值法 (radial basis functions, RBF) 和普通

克里格 (ordinary kriging, OK) 3 种空间插值方法。其中 RBF 选取张力样条函数 (spline with tension)、规则样条 (completely regularized

spline)、高次曲面(multiquadric)以及反高次曲面(inverse multiquadric)4种插值方法。全文共采用6种空间插值方法。

插值方法结果采用交叉验证(cross-validation)的方法:即对于每一种插值方法,交叉验证分析重复从已知数据集中删除一个采样点的过程,用剩下的采样点估算被删除点的数值,并计算平均误差(mean error, ME)、误差均方根(root mean square error, RMSE)和标准化平均误差(mean standardized error, MSE)。空间插值结果效果的判断标准为,ME的绝对值最接近于0, MSE最接近于0, RMSE越小越好(汤国安等2006)。所有插值操作均在ArcGIS 9.2 Geostatistical Wizard中进行。428个蘆草密度插值点利用ArcGIS 9.2软件中Geostatistical analysis tools下的Create Subsets功能,按照80%、20%分为训练(training)样本(342个)和验证(test)样本(86个)数据集(图1c)。

2 结果分析

2.1 插值结果对比 6种空间差值结果及验

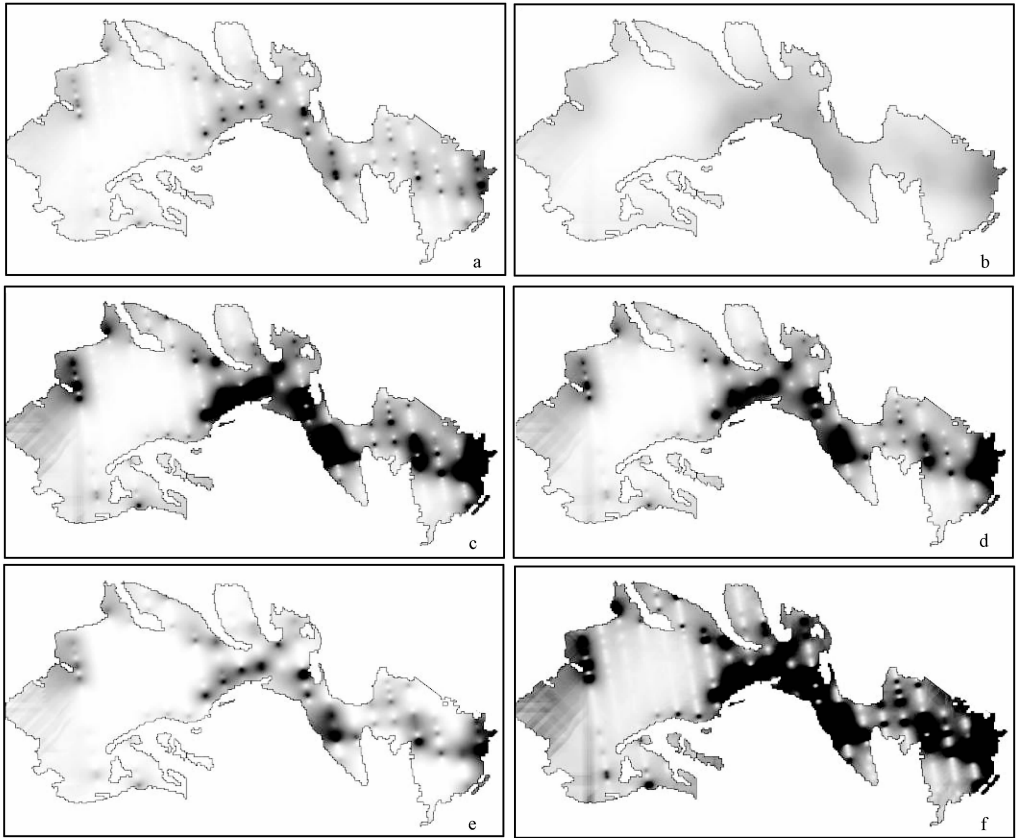
证参数统计见表1和图2。总体上,6种插值结果中无训练样本覆盖的地点(研究区最西部)插值效果不甚理想,均出现条带现象(图2)。6种空间差值方法平均误差的绝对值结果相差较大,其中以张力样条插值结果最为接近于0;张力样条和规则样条插值中RMSE最低且相等,两者插值结果的空间分布略有差异(图2c和d)。

IDW以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,权重系数与距离成反比,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,所得插值结果越精确,该方法极易受到异常值的影响。本研究中,IDW方法插值结果最小误差最低,但精度却不高(图2a)。克里格是有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法,属于非精确性插值,具有最低的最大误差和最小的MSE。但由于普通克里格插值过程类似于加权滑动平均,使用非精确性插值法可以避免在输出表面上出现明显的波峰或波谷,对整个插值区域的平滑效应十分显著,缺乏空间细节信息,所以精度也不甚理想。径向基函数插值

表1 基于test数据集的各种插值方法结果比较

Table 1 Comparison of results of the different interpolation methods evaluated by the test data subsets ($n = 86$, unit: no./m²)

插值方法 Interpolation method	平均误差 Mean error	最小误差 Min error	最大误差 Max error	均方根误差 Root mean square error	标准化平均误差 Mean standardized error
反距离权重 Inverse distance weight	0.151 8	0.0275	224.13	67.350	5.080
普通克里格 Ordinary kriging	-0.163 6	0.8400	164.54	69.025	4.205
规则样条 Completely regularized spline	0.015 6	0.1775	228.71	66.850	5.483
张力样条函数 Spline with tension	-0.002 9	0.4100	226.11	66.850	5.420
高次曲面 Multiquadric	0.819 3	-8.2825	299.40	71.800	7.405
反高次曲面 Inverse multiquadric	-0.4460	0.0400	221.28	67.100	5.275



蕙草球茎空间密度

Tuber density of the two *Scirpus* species (no./m²)



图 2 基于 6 种空间插值的蕙草密度分布

Fig. 2 Distribution of the tuber density of the two *Scirpus* species based on the six spatial interpolation methods

6 种空间插值方法包括基于反距离权重(a)、普通克里格(b)、规则样条(c)、张力样条(d)、高次曲面(e)和反高次曲面(f)。

The six spatial interpolation methods include the inverse distance weight (a), the ordinary kriging (b), the completely regularized spline (c), the spline with tension (d), the multiquadric (e), and the inverse multiquadric (f).

法将一个软膜插入并经过各个已知样点,同时又使表面的总曲率最小。该方法适用于对大量点数据进行插值计算。四种径向基函数中,两种样条插值方法的精度最高,其中张力样条的结果优于规则样条。从图 2c 和 2d 来看,张力样条插值结果边界也更为平滑,同时富含细节信息。高次曲面的插值结果明显低于其他方法,整体精度最低(平均误差最大)。反高次曲

面的结果与样条插值相似,均方根误差尚可,但是平均误差较大(图 2e、f)。

综上所述,6 种空间方法都可以很好地模拟研究区蕙草球茎密度的空间分布趋势,但根据交叉验证结果及插值结果的空间分布,张力样条的插值效果最佳,是最适于本地区蕙草球茎密度空间插值的方法。

2.2 蕙草球茎密度空间分布 按照张力样条

插值的结果统计,研究区内蘆草球茎密度均值为 (46.0 ± 44.3) 个/ m^2 ,其中最大值为341.6个/ m^2 。从蘆草密度的五个等级来看(表2), <25个/ m^2 的蘆草分布占研究区面积的41.7%,主要分布在泡沼中心水位较深区域(图3);25~50和50~100个/ m^2 的蘆草分布面积基本相

当,分别占研究区的22.3%和23.6%,主要分布在泡沼次水深区域,位于水位较深的区域周边;>100个/ m^2 的面积仅占研究区的12.4%,位于泡沼边缘,呈斑块状分布。根据密度插值结果,计算得出研究区内约有 11.68×10^9 粒蘆草球茎可供白鹤取食。

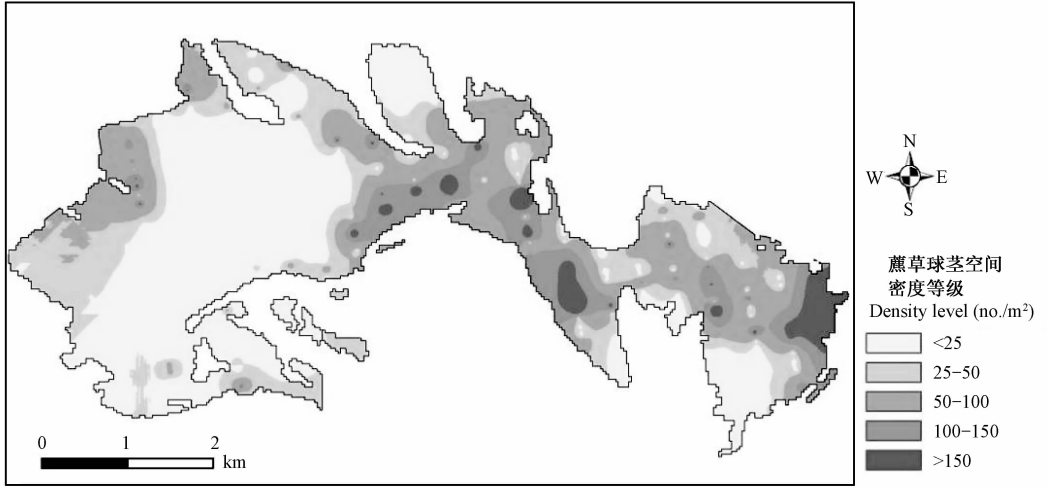


图3 张力样条法获取的5个不同等级蘆草球茎密度的空间分布

Fig.3 Distribution of the five tuber density levels of the two *Scirpus* species by the interpolation of spline with tension

表2 张力样条法获取研究区五个不同球茎密度等级蘆草的分布面积和面积百分比

Table 2 Distribution area and area percentage of five tuber density levels at the study area by the interpolation of spline with tension

	密度等级 Density level(No./m ²)				
	<25	25~50	50~100	100~150	>150
面积 Area (hm ²)	808.5	432.3	458.8	173.3	68.4
面积百分比 Area percentage (%)	41.7	22.3	23.6	8.9	3.5

3 讨论

传统的地面点状采样方法难以获取整个区域作为白鹤主要食物来源的蘆草球茎密度及其空间分布信息。本文以野外采样数据为基础,选择适当的插值方法,预测整个区域内未知点的蘆草球茎密度,插值结果较好地反映了整个地区蘆草球茎密度空间分布。研究表明,径向基函数中样条插值法在蘆草球茎密度插值精度和空间分布趋势的表现均优于其他方法。为避免产生极值的现象,张力样条插值法更适宜于

该区域的蘆草球茎密度插值。

反距离权重插值是一种常用而简单的空间插值方法,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本赋予的权重越大,此种方法简单易行,直观并且效率高;在已知点分布均匀的情况下插值效果好,插值结果在用于插值数据的最大值和最小值之间,但缺点是易受极值的影响(Li et al. 2008)。由于本研究区中邻近样本值差异较大,因此该方法插值效果不甚理想。

比较普遍应用的普通克里格插值方法,在

本研究中表现也并不理想。克里格方法在插值过程不仅考虑预测点与邻近样点数据间的空间距离关系,还考虑各参与预测的样点间的位置关系,充分利用各样点数据的空间分布结构特征。在点稀少时插值效果比反距离权重等方法要好。在样本点存在空间自相关性或者方向性趋势时,克吕金是最合适的插值方法,目前被广泛地应用于土壤学和地质学中(李新等 2000)。本研究中,样本量丰富,某些样本距离较小但样本值差异较大。克里格插值为了实现全局线性无偏最优估计,避免过多的波峰波谷出现,牺牲了邻近样本值差异较大的细节信息,最终导致均方根误差值较大,而不能准确模拟研究区的蔗草球茎的密度。

从张力样条插值结果来看,两种蔗草球茎密度较大的区域均位于湿地的边缘地带,这由两种蔗草的生物学特性决定(钱希 1988),也与该区域植被演替的自然规律一致。如果水位过高,土壤盐分下降,蔗草将演替为芦苇和蒲草;如果湿地缺水或者干旱,土壤出现盐渍化,蔗草将被碱蓬(*Suaeda glauca*)、水稗和虎尾草替代(惠淑荣等 2009)。因此,对于盐碱地区域,水位和土壤含盐量是维持蔗草球茎生物量的关键因子。

最佳空间插值结果显示,该区域 41.7% 面积的蔗草球茎密度 < 25 个/ m^2 ,水位较深,不适宜于白鹤停歇觅食。密度介于 $25 \sim 50$ 个/ m^2 的区域,水位相对较深;随着迁徙季节的推移,蒸发和土壤渗漏导致水位下降,该区域是白鹤重要的潜在觅食地。而仅占整个分布区面积的 36% 的区域(密度 > 50 个/ m^2)是迁徙白鹤的适宜停歇觅食地。尽管如此,鹅头泡湿地自 2007 年首次发现白鹤秋季停歇种群以来,迁徙种群数量和停歇时间仍持续显著增加(邹畅林等 2008,江红星 2010,相桂权等 2010)。同时,王宇嘉等(2012)对该地区白鹤春季迁徙种群行为观察发现觅食时间占昼间活动的 64.24%。这些综合表明该处湿地对于白鹤补充能量,以顺利完成整个迁徙至关重要。

与李枫等(2007)对扎龙春季白鹤日间活

动规律研究结果比较,鹅头泡湿地中白鹤的游走时间仅为扎龙白鹤的 1/6,觅食时间为其 2 倍。这也说明了扎龙湿地食物性资源的匮乏,导致其迁徙种群数量显著下降(黄方等 2007);而鹅头泡湿地丰富的食物资源是白鹤数量增加的主要原因。但如何定量化揭示中途停歇白鹤与蔗草球茎密度、水深之间的生态关系,结果将直接有助于该区域的水位调控、植被管理和白鹤迁徙种群的长期稳定。本研究准确评估白鹤中途停歇地食物性植物的生物量,为进一步探讨中途停歇地白鹤的生态需求,以及该区域迁徙白鹤的环境容纳量提供了重要的基础数据。

参 考 文 献

- Bater C W, Coops N C. 2009. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2): 289-300.
- BirdLife International. 2012. *Leucogeranus leucogeranus* // IUCN 2012. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.1. [EB/OL]. [2012-07-16]. <http://www.iucnredlist.org>.
- Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, et al. 2002. Migration routes and important resting areas of Siberian cranes (*Grus leucogeranus*) between northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking. *Biological Conservation*, 106(3): 339-346.
- Li J, Heap A D. 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Canberra: Geoscience Australia, 87-95.
- Meine C D, Archibald G W. 1996. *The Cranes*. Switzerland: IUCN, Gland.
- Wu G F, de Leeuw J, Skidmore A K, et al. 2009. Will the Three Gorges Dam affect the underwater light climate of *Vallisneria spiralis* L. and food habitat of Siberian crane in Poyang Lake? *Hydrobiologia*, 623(1): 213-222.
- 蔡福,于慧波,矫玲玲,等. 2006. 降水要素空间插值精度的比较——以东北地区为例. *资源科学*, 28(6): 73-79.
- 陈光,贺立源,詹向雯. 2008. 耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究. *土壤通报*, 39(5): 1007-1011.
- 傅沛云. 1995. 东北植物检索表. 2 版. 北京: 科学出版社, 853-854.
- 何春光,宋榆钧,郎惠卿,等. 2002. 白鹤迁徙动态及其停歇地环境条件研究. *生物多样性*, 10(3): 286-290.
- 黄方,王平,王永洁,等. 2007. 扎龙湿地生态环境变化及其

- 对白鹤迁徙的影响. 东北师范大学学报: 自然科学版, 39(2): 106-111.
- 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 2001. 地理信息系统概论. 北京: 高等教育出版社, 93-103.
- 惠淑荣, 李响, 张志翔, 等. 2009. 土壤含盐量对扁秆藨草生长的影响. 辽宁林业科技, (1): 25-28.
- 江红星. 2010. 吉林莫莫格国家级自然保护区 2010 年春季白鹤迁徙日最高统计达 3128 只. 中国鸟类研究简讯, 19(1): 6, 28.
- 李方满. 1997. 白鹤春迁林甸停歇地的生态研究. 牡丹江师范学院学报: 自然科学版, (2): 1-4.
- 李枫, 汪青雄, 卢珊, 等. 2007. 扎龙湿地白鹤春季停歇地昼间时间分配及活动规律. 动物学杂志, 42(3): 68-72.
- 李新, 程国栋, 卢玲. 2000. 空间内插方法比较. 地球科学进展, 15(3): 260-265.
- 林琳, 李纯厚, 戴明, 等. 2007. 海洋浮游植物丰度的空间插值优化. 生态学报, 27(7): 2880-2888.
- 林啸, 刘敏, 侯立军, 等. 2007. 上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价. 中国环境科学, 27(5): 613-618.
- 马志军, 李博, 陈家宽. 2005. 迁徙鸟类对中途停歇地的利用及迁徙对策. 生态学报, 25(6): 1404-1412.
- 潘志强, 刘高焕. 2002. 面插值的研究进展. 地理科学进展, 21(2): 146-152.
- 钱希. 1988. 扁秆藨草的生物学特性及防治研究. 植物生态学与地植物学学报, 12(3): 205-215.
- 孙志勇, 黄晓凤. 2010. 鄱阳湖越冬白鹤觅食地特征分析. 动物学杂志, 45(6): 46-52.
- 汤国安, 杨昕. 2006. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社.
- 王里, 吴志刚. 1989. 莫莫格自然保护区. 北京: 中国林业出版社, 12-13.
- 王宇嘉, 范巍巍, 李晓民. 2012. 吉林莫莫格白鹤春季行为研究. 野生动物, 33(2): 67-70.
- 相桂权, 张洪岩, 吴景才, 等. 2010. 莫莫格湿地景观格局变化对白鹤停歇种群动态的影响. 东北师范大学学报: 自然科学版, 42(3): 126-131.
- 郑志华. 2008. 莫莫格湿地扁秆藨草繁育特性与生态特性研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 朱求安, 张万昌, 余钧辉. 2004. 基于 GIS 的空间插值方法研究. 江西师范大学学报: 自然科学版, 28(2): 183-188.
- 邹畅林, 王波, 王永. 2008. 莫莫格春季白鹤迁徙报告. 鹤类通讯, 12(1): 24.