

7-2-2020

## Impact Analysis on Distribution Prediction of Stipa Species under Climate Change

Xuqing Tang

*School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Jianlin Li

*School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Impact Analysis on Distribution Prediction of Stipa Species under Climate Change

## Abstract

**Abstract:** Based on the actual climatic data from 1981 to 2000 in Northeast China, the predicted climatic data and the actual distribution data of *Stipa* species, 12 climatic factor indicators affecting *Stipa* species distribution were extracted combining with similar biological and ecological characteristics of *Stipa*. By introducing Gauss Competitive Exclusion Principle and the statistical analysis method, a competitive stochastic mathematical model of the distribution of *Stipa* was built, and the corresponding algorithm was given. *The forecast figures were obtained for the optimal, medium and general adaptable distribution of the five Stipa species from 2041 to 2050 and from 2091 to 2100. Furthermore, by analyzing the prediction, it was shown that the climate change and inter-specific competition were the main impact factors for predicting the distribution of Stipa baicalensis Roshev, Stipa klemenzii Roshev and Stipa breviflora Griseb, and the inter-specific competition is the most impact factor for predicting the distribution of Stipa grandis P.Smirn and Stipa krylovii Roshev from the medium-term results. From the perspective of long-term results, the climate change is the important reason for affecting five Stipa species competitive distribution.*

## Keywords

Stipa, climate factors index, species competition, species distribution, stochastic forecast model, simulation

## Recommended Citation

Tang Xuqing, Li Jianlin. Impact Analysis on Distribution Prediction of Stipa Species under Climate Change[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 956-965.

## 气候变化对多针茅竞争分布预测与影响分析

唐旭清, 李建林

(江南大学理学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 在 1981-2000 年间我国东北地区主要针茅物种的分布区调查数据, 以及分布区气候数据基础上, 结合针茅类生物学与生态学特征, 提取影响针茅物种的 12 个气候因子指标。引入 Gauss 竞争原理及统计分析方法, 建立起针茅分布竞争的随机预测数学模型, 并给出相应算法。获得了 2041-2050 和 2091-2100 年针茅的最适应、次适应和可适应竞争分布区域预测图。分析表明: 气候变化和种间竞争是影响贝加尔针茅、小针茅和短花针茅的中期竞争分布预测主要原因, 而种间竞争是影响大针茅和克氏针茅的中期竞争分布预测的最重要原因; 气候变化是影响 5 种针茅长期竞争分布预测的最重要原因。

**关键词:** 针茅; 气候因子指标; 物种竞争; 物种分布; 随机预测模型; 仿真

中图分类号: TP391.9, O29

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 04-0956-10

## Impact Analysis on Distribution Prediction of Stipa Species under Climate Change

Tang Xuqing, Li Jianlin

(School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Based on the actual climatic data from 1981 to 2000 in Northeast China, the predicted climatic data and the actual distribution data of *Stipa* species, 12 climatic factor indicators affecting *Stipa* species distribution were extracted combining with similar biological and ecological characteristics of *Stipa*. By introducing Gauss Competitive Exclusion Principle and the statistical analysis method, a competitive stochastic mathematical model of the distribution of *Stipa* was built, and the corresponding algorithm was given. The forecast figures were obtained for the optimal, medium and general adaptable distribution of the five *Stipa* species from 2041 to 2050 and from 2091 to 2100. Furthermore, by analyzing the prediction, it was shown that the climate change and inter-specific competition were the main impact factors for predicting the distribution of *Stipa baicalensis* Roshev, *Stipa klemenzii* Roshev and *Stipa breviflora* Griseb, and the inter-specific competition is the most impact factor for predicting the distribution of *Stipa grandis* P.Smirn and *Stipa krylovii* Roshev from the medium-term results. From the perspective of long-term results, the climate change is the important reason for affecting five *Stipa* species competitive distribution.

**Keywords:** Stipa; climate factors index; species competition; species distribution; stochastic forecast model; simulation

## 引言

全球变暖现已成了不争的事实<sup>[1-2]</sup>。随着气候

各因子变化, 其对全球生态系统产生了深刻的影响, 进而影响到全球的物种的物候与物种的分布。因此, 未来气候变化对物种分布的影响与预测问题一直是人们关注的中心问题之一<sup>[3-5]</sup>。

针茅属(*Stipa* L.)植物是禾本科(Gramineae)针茅族(Stipeae)中种类较多的一属, 是构成我国草原植被的重要类群之一, 我国分布有 34 种。其中大



收稿日期: 2014-11-21 修回日期: 2015-03-01;  
基金项目: 国家自然科学基金(11371174); 环保部公益性行业科研专项(200909070);  
作者简介: 唐旭清(1963-), 男, 安徽望江, 博士, 教授, 研究方向为智能计算, 生态系统建模与仿真和生物信息学; 李建林(1986-), 女, 内蒙古, 硕士生, 研究方向为生态系统建模与仿真和生物信息学。

<http://www.china-simulation.com>

针茅(*Stipa grandis* P.Smirm.)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis* Roshev.)、克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.)、小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev.)和短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)分布于我国内蒙古中东部、东北(松辽平原),另外俄罗斯(东西伯利亚南部、远东东南部和外贝加尔),蒙古东部和北部也有<sup>[6-7]</sup>。大针茅是中温型半干旱典型草原的建群种,贝加尔针茅是中温型半湿润、半干旱型典型草原的建群种,克氏针茅是中温型干旱典型草原的建群种,小针茅是中温型荒漠草原的建群种,短花针茅是暖温型荒漠草原的建群种。

有关针茅种群生物学与生态特征,以及气候变化对其分布影响与预测研究已有大量文献。赵念席等<sup>[8]</sup>研究显示大针茅种群内基因多样性与温度因子之间存在显著或极显著的相关关系,周双喜等<sup>[9]</sup>进行了降雨量变化对大针茅幼苗的影响研究。刘景玲等<sup>[10]</sup>研究表明气候因子的选择作用在克氏针茅遗传分化中起重要作用,同时克氏针茅在生长的各个物候期与气候指标间关系密切<sup>[11]</sup>。韩国栋<sup>[12]</sup>和张昊等<sup>[13]</sup>进行了降水量、气温等气候因子对小针茅草原植物群生态系统的影响研究。蒙荣等<sup>[14]</sup>分析了短花针茅荒漠草原群落优势种群空间格局,张庆等<sup>[15]</sup>进行了短花针茅群落数量分类及环境解释的研究。此外,张庆等<sup>[6]</sup>利用 RAPD 分子标记技术和主成分分析(PCA)对内蒙古中西部草原区大针茅、克氏针茅、小针茅、本氏针茅和短花针茅等 5 种针茅的遗传多样性进行研究,结果表明针茅属植物具有丰富的遗传多样性,对环境的适应能力较强,且水热成为其地理分布的决定性因素。刘玉宏等<sup>[16]</sup>从竞争、生态习性、生态适应等种间联结理论解释了内蒙古锡林郭勒草原大针茅-克氏针茅群落的种间关联特征。袁文平等<sup>[17]</sup>利用积分回归模型探讨中国东北样带的大针茅、克氏针茅和贝加尔针茅等 3 种针茅草原群落初级生产力对降水季节分配的响应,研究显示制约 3 类针茅群落初级生产力年度变化的是降水,且降水的季节分配对于 3

类针茅群落初级生产力的形成有着不同的作用,其中大针茅群落与克氏针茅群落相比对降水的利用效率较高,贝加尔针茅群落具有更高效的降水利用率。这些研究都表明大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅的分布与分布区内的气候因子密切相关,且具有以下共同特点:

- (1) 它们都具有较强环境的适应能力;
- (2) 它们同属于禾本科针茅族的针茅属,具有相近的生物学和生态学特征;
- (3) 它们都在每年的 4 月底或 5 月初返青,每年的 8 月底或 9 月份枯萎;
- (4) 它们的群落初级生产力年度变化都与温度、降水量、蒸发量、净辐射等气候因子的年度变化有关。

最近,利用不同长时间序列气候变化情景分析对物种分布影响正日益受到关注。Erasmus 等<sup>[4]</sup>选择年及月均气温、年及月最高最低气温及繁殖期降水量, Forsman 等<sup>[18]</sup>选择最冷月气温和年均气温及繁殖期气温和降水量, Luoto 等<sup>[19]</sup>选择最冷月气温和降水量及大于 5 °C 的积温,进行气候变化对物种分布影响与预测模型的研究。张雷等<sup>[20-21]</sup>选用 7 个为与物种生理特征有关的气候变量(年平均气温、最冷月平均气温、最暖月平均气温、气温年较差、年平均降水量、平均夏季降水量及大于 5 °C 的积温和 10 个环境变量,分析气候变化对我国主要树种马尾松和油松的潜在分布预测与影响研究。不同的气候要素选择及不同气候变化情景对于的研究结果影响也很大。Graham 等<sup>[22]</sup>进行了空间分布模型预测中不确定性分析研究。吴建国等<sup>[23]</sup>采用分类和回归树(CRT)模型,在不同气候变化情景下模拟分析了气候变化对大熊猫分布范围及空间格局的影响研究。晏寒冰等<sup>[24]</sup>建立树种分布预测的随机预测数学模型,进行气候变化对我国东北地区兴安落叶松、白桦和红皮云杉的分布预测与影响研究。

本文将在文献[24]及大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅 1981-2000

年在我国东北地区分布区调查数据和相关气候数据的基础上,通过引入物种的 Gauss 竞争排斥原理,进行未来气候变化条件对多物种竞争的分布预测与影响研究。

## 1 气候因子提取与模型假设

### 1.1 基本数据

研究区域为我国东北地区,包括辽宁、吉林、黑龙江及内蒙古东部地区,其东经度范围为 102.0042 11~135.0987 41E, 北纬度范围为 37.510 628~53.704 211 N, 记为 $\Omega$ 。研究区域面积约为 147 万平方公里,约占全国国土面积的 15% 左右。研究数据包括研究区域内的物种分布的调查数据和气候数据。

(1) 针茅类分布调查数据: 1981-2000 年间东北地区针茅类的分布数据来源是根据内蒙古草原勘测设计院历年来的调查数据及文献资料挖掘,通过应用地理信息系统 GIS 而获得,包括大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等五种针茅在东北地区的分布见图 1。在 GIS 界面下,对研究区域 $\Omega$ (见图 1)以间隔是 0.008 421 度(注:相当于地图上实际距离是 1 km)分别沿东经度和北纬度增大方向作网格,可获取 1981-2000 年间东北地区大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅分布的数据矩阵,记为  $Z_k, k=1,2,\dots,5$  分别表示大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅。其中:每个分布数据矩阵是 3 930 列和 1 923 行,且数据矩阵左上角第一个元素所在的(东)经(北)纬度为(102.004 211, 37.510628),数据矩阵的列数对应于经度且增大的方向相同,数据矩阵的行数对应于(北)纬度且增大的方向相同;每个分布数据矩阵的数据取值范围为 1, 0 和 -1, 分别表示某针茅在该点有分布、无分布和该点在境外。可统计 1981-2000 年东北地区大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅在 $\Omega$  内分布的点数分别是 59 835, 33 572, 68 113, 50 086 和 12 570。

(2) 气候数据: 研究区内气候数据由国家气象中心提供,其根据我国 1951-2000 年的气候数据,应用 MIROC-RegCM 模式模拟数据得到的气候情景数据 20C3M(1951-2000) 和未来气候情景 SRESA1B(2001-2100)。以(1)中相同网格方式取出我国东北局部地区 $\Omega$  内 1981-2000 年、2041-2050 年和 2091-2100 年的月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、月平均最高温度( $^{\circ}\text{C}$ )、月平均最低温度( $^{\circ}\text{C}$ )、月平均平均蒸发(mm)、月平均降水(mm)等 5 个气候指标的平均数据,且以 GIS 文本格式存放数据。所有在境外点的数据都记为-9999。

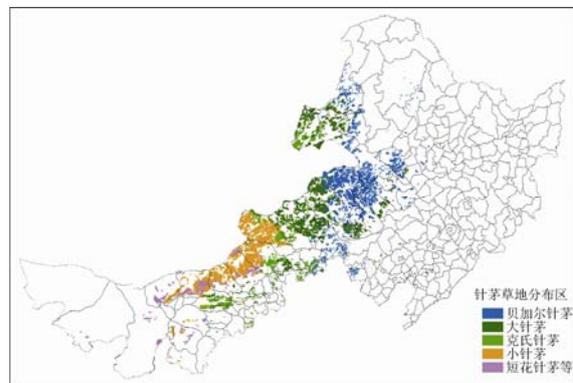


图 1 1981-2000 年东北地区大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅分布图

### 1.2 分布预测的气候因子指标提取

生物物种的分布是一个复杂的过程,它既与物种分布区域内的气候因子相关,也与物种自身的生物学特征及物种生长的分布区域生态环境密切相关,涉及因素众多<sup>[21,23]</sup>。本研究仅仅考虑生物物种的分布与气候因子相关性研究。由于月平均净辐射、月平均相对湿度和月平均风速都与月平均气温、月平均最高温度、月平均最低温度、月平均平均蒸发和月平均降水密切相关。因此本研究只考虑在月平均气温、月平均最高温度、月平均最低温度、月平均净辐射和月平均降水这五个指标数据的基础上提取的 12 个气候指标,而忽略掉其他气候影响因子。结合针茅及植物的生长对气候因子依赖的特点,及 5 种针茅都在每年的 4 月底或 5 月初返青和每年的 8 月底或 9 月份枯萎<sup>[25]</sup>,可确定每年的

4-9 月份为针茅的生长期。因此在 5 个气候指标的基础上, 提出如下 12 个影响针茅分布的气候因子指标: (1)  $E$  表示年平均月蒸发量; (2)  $E_{4-9}$  表示 4-9 月份平均月蒸发量; (3)  $P$  表示年平均降水量; (4)  $P_{4-9}$  表示 4-9 月份平均降水量; (5)  $T$  表示年平均温度; (6)  $T_{\max}$  表示年平均最高温度; (7)  $T_{\min}$  表示年平均最低温度; (8)  $T_{4-9}$  表示 4-9 月份平均温度; (9)  $T_{\max 4-9}$  表示 4-9 月份平均最高温度; (10)  $T_{\min 4-9}$  表示 4-9 月份平均最低温度; (11)  $T_{\max 1-3, 10-12}$  表示 1-3 和 10-12 月份平均最高温度; (12)  $T_{\min 1-3, 10-12}$  表示 1-3 和 10-12 月份平均最低温度。

在东北局部地区  $\Omega$  内 2041-2050 年和 2091-2100 年的月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、月平均最高温度、月平均最低温度、月平均蒸发、月平均降水等 5 个气候指标的平均数据基础上, 通过统计计算可得研究区域  $\Omega$  的  $3930 \times 1923$  网格上每个点的 12 个气候因子指标值  $z_{ijk}^t$ , 其中  $i=1, 2, \dots, 3930$  表示每个数据矩阵的列数,  $j=1, 2, \dots, 1923$  表示每个数据矩阵的行数,  $s$  取 1 和 2 分别表示 2041-2050 年和 2091-2100 年这 2 个时间段, 上标  $t=1, 2, \dots, 12$  分别表示  $E, E_{4-9}, P, P_{4-9}, T, T_{\max}, T_{\min}, T_{4-9}, T_{\max 4-9}, T_{\min 4-9}, T_{\max 1-3, 10-12}$  和  $T_{\min 1-3, 10-12}$  等 12 个气候因子指标。于是可记东北地区关于 2041-2050 年和 2091-2100 年的 2 个时间段、12 个气候因子指标的数据矩阵  $Z_s^t$ 。

### 1.3 模型假设

以下将在 1.2 中提取的 12 个气候因子指标的基础上, 给出建模假设。

**假设 1.** 各物种在分布区域内的关于 12 个气候指标数据分别服从某一随机分布。

由于在 1981-2000 年间的东北地区针茅类关于 12 个气候指标的基本数据量较大, 如大针茅有 59 835 个, 贝加尔针茅有 68 113 个, 克氏针茅有 33 572 个, 小针茅有 50 086 个和短花针茅有 12 570 个。因此将这 12 个气候指标的数据假设为分别服从某一随机分布是合理的。

**假设 2.** 各物种对各气候因子的依赖性稳定的, 且是相互独立的, 即不考虑每个物种的生物学

和生态学特征的变化, 特别是随着全球气候变化而带来的物种对各气候因子的适应性的改变。

由于每个物种的生物学特征是该物种自身长期进化以及与生态系统和气候环境相适应的结果, 各物种对各气候因子的依赖具有相对稳定性。假设 2 也将成为本文中物种分布预测提供研究基础, 其中“物种对各气候因子的依赖性相互独立的”是一个简化模型研究的条件。

由假设 1 和 2, 物种分布可行性区域的问题就转化为各气候因子的可行性区域的研究, 只是各气候因子的可行必须同时成立。而由假设 1, 某气候因子的可行性可转化为该气候因子在某一取值区间上的概率时  $1-\alpha$  来体现。至于物种分布的最适分布气候区、次适分布气候区和可分布气候区的划分就可通过所取的概率的大小来体现, 例如最适分布气候区是指概率为 0.9(即  $\alpha=0.1$ )、次适应分布气候区是指概率为 0.95(即  $\alpha=0.05$ )和可适应分布气候区是指概率为 0.99(即  $\alpha=0.01$ )。

**假设 3.** 在同一生态群落中各物种的分布满足 Gauss 竞争排斥原理(Competitive Exclusion Principle, Gauss, 1934)原理, 即: 如果许多物种占据一个特定的环境, 他们要共同生活下去, 必然要存在某种生态学差别(具有不同的生态位), 否则它们不能在相同的生态位内永久地共存。特别地, 如果已知一个物种已经分布于某一区域, 经过若干年之后, 这一区域仍适合于该物种生存, 尽管这一区域也适合于其他物种(注: 其与该物种具有相同或相近的生态位)生存, 仍认为经过若干年之后, 这一区域仍是该物种的分布区。

由于贝加尔针茅、克氏针茅、大针茅、小针茅和短花针茅等同属于一个属的植物物种, 它们具有相同或相近的生态位。从调查的东北地区这些物种的分布区域可以看到它们的分布区域是相互交织的。因此, 假设 3 将是处理一个区域内多物种未来分布预测的一个基本准则。

以下将在这 12 个气候因子指标的基础上, 结合模型假设 1-3, 讨论气候变化对针茅类分布竞争预测和影响。

## 2 研究方法

### 2.1 1981-2000 年针茅类气候指标置信区间

在 1981-2000 年间东北地区大针茅、克氏针茅、贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅分布区数据和相应的月平均气温(°C)、月平均最高温度(°C)、月平均最低温度(°C)、月平均蒸发(mm)、月平均降水(mm)等 5 个气候因子的平均数据(注: 20 年的平均数据)基础上, 采用类似于文献[24]中

的处理方法, 可获得 5 种针茅关于 12 个气候因子指标的置信度为  $1-\alpha$  的置信区间, 其中  $\alpha$  分别取 0.1, 0.05 和 0.01, 且每个表中的每个指标的置信度为 90%, 95%, 99% 的置信区间具有嵌套关系。例如表 1 为 1981-2000 年大针茅分布的 12 气候指标的置信度为  $1-\alpha$  的置信区间, 其余的 4 种针茅分布的 12 气候指标的置信度为  $1-\alpha$  的置信区间这里略去。这些 12 个气候因子指标的置信区间将为针茅类分布的竞争预测研究提供支撑。

表 1 1981-2000 年大针茅分布的 12 气候指标的置信度为  $1-\alpha$  的置信区间

置信度 $\alpha$	$E$	$E_{4-9}$	$P$	$P_{4-9}$	$T$	$T_{\max}$
0.1	[37.72, 56.37]	[55.45, 91.48]	[37.77, 81.25]	[63.93, 149.13]	[-0.49, 4.29]	[13.18, 19.96]
0.05	[33.68, 56.37]	[55.45, 98.58]	[37.34, 87.77]	[62.55, 162.85]	[-0.49, 5.52]	[13.18, 21.68]
0.01	[32.33, 59.31]	[52.9, 103.73]	[34.68, 97.38]	[53.88, 177.13]	[-0.83, 5.81]	[13.02, 22.09]
置信度 $\alpha$	$T_{\min}$	$T_{4-9}$	$T_{\max 4-9}$	$T_{\min 4-9}$	$T_{\max 1-3, 10-12}$	$T_{\min 1-3, 10-12}$
0.1	[-12.03, -6.78]	[10.55, 15.13]	[26.45, 31.48]	[-1.63, 3.78]	[-0.13, 8.63]	[-23.9, -17.32]
0.05	[-12.03, -5.38]	[10.55, 16.33]	[26.17, 32.73]	[-1.8, 5.25]	[-0.13, 10.03]	[-23.9, -16.6]
0.01	[-12.54, -5.31]	[9.95, 16.78]	[26.15, 33.87]	[-1.92, 6.05]	[-0.3, 10.85]	[-24.27, -15.87]

### 2.2 多物种竞争的随机预测模型算法

以下在表 1 和假设 3 的基础上, 对给定的  $\alpha$  (注: 分别取 0.10, 0.05, 0.01), 给出东北地区大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅在未来气候变化下竞争的气候分布区预测的算法如下。

#### 算法 A:

Step 1. 给定  $\alpha$ ;

Step 2. 在东北地区某时间段的 12 个气候指标的数据矩阵  $Z_k^t$  和表 1 的基础上, 对针茅  $k$  在 1981-2000 年的分布矩阵  $Z_k$  内存在的点进行  $s$  时间段的 12 个气候因子指标  $E, E_{4-9}, P, P_{4-9}, T, T_{\max}, T_{\min}, T_{4-9}, T_{\max 4-9}, T_{\min 4-9}, T_{\max 1-3, 10-12}$  和  $T_{\min 1-3, 10-12}$  的检验。如果该值在  $1-\alpha$  置信区间内, 则该点保留, 即仍记为 1; 否则记为 0。可获得针茅  $k$  在  $s$  时间段的存留区域  $S_k$ , 这样处理的依据为假设 3。记 5 种针茅总的存留区域为  $S_0 = \bigcup_{i=1}^5 S_i$ , 而外部区域记为  $\overline{S_0}$  (注: 相对于  $\Omega$ );

Step 3. 在存留区域  $S_0$  的基础上, 向区域  $S_0$  外

围选取一圈点(注: 每扩展一圈表示向外扩张 1 km), 称其为扩展点; 在每一轮扩展中, 可扩展的要求是该点不在标记矩阵中。然后对这些扩展点进行适应性检验。如果一个扩展点同时适应两个或两个以上的针茅, 则依据假设 3: 采用就近的原则, 判定该点属于某一针茅。将通过的点加入到该针茅的存留区域与标记矩阵中, 这样就表示该针茅已经占领该点, 其他针茅不可以在此点扩散。如果某一轮检验中, 针茅没有任何新的点加入存留区域, 则停止该针茅的扩展进程, 其他针茅将继续扩展;

Step 4. 重复步骤 Step 3, 直到没有扩展点通过检验或者扩展轮数达到  $K$ , 扩展停止。标识存留区域内的点。

关于 Step 4 中  $K$  的计算方式如下: 若已知物种自然扩散水平为  $r$  (km/年), 则经过  $t$  年后就扩散了  $r \cdot t$ , 而  $K$  取  $r \cdot t$  的整数, 即  $K = [r \cdot t]$ , 其中  $r$  的取值依赖物种的生物学特征。由于针茅类植物主要通过种子繁殖和根系繁殖两种方式繁殖, 且具有较强的适应能力。在自然状态下, 其传播速度较快。以下关于针茅类的扩散仿真中取  $r = 2$  km/年, 如

1981-2000 年到 2041-2050 年经过了 55 年, 大致扩散 110 km, 即取  $K = 110$ 。

### 3 气候变化下针茅类竞争分布预测

在东北地区 2041-2050 年时间段的 12 个气候因子指标的数据矩阵  $Z'_i$  的基础上, 在应用软件 ArGIS9.3 环境下, 通过 Matlab 编程运行算法 A 可获得我国东北地区 2041-2050 年大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅最适应( $\alpha=0.1$ )、次适应( $\alpha=0.05$ )和可适应( $\alpha=0.01$ )分布气候区竞争预测图见图 2 所示。

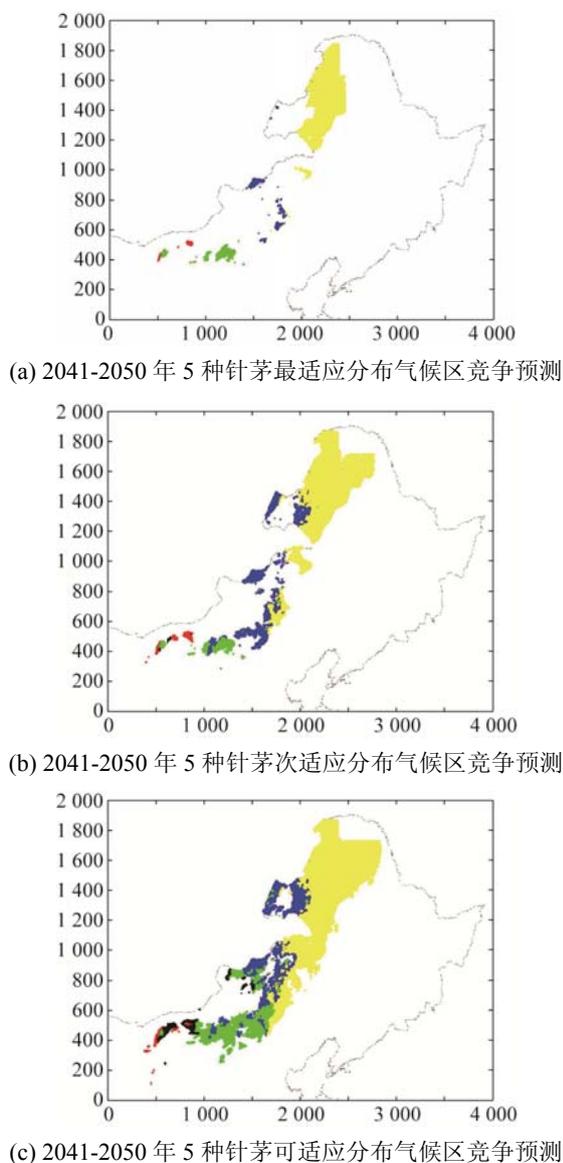


图 2 2041-2050 年 5 种针茅分布气候区竞争预测图

其中: 蓝色为大针茅, 黄色为贝加尔针茅, 鲜绿色为克氏针茅, 黑色为小针茅, 红色为短花针茅。每幅图片左下角对应的是实际图上的(东)经(北)纬度为(102.004 211, 37.510 628)的点; 图中横坐标和纵坐标分别沿东经度和北纬度增大方向, 坐标轴上数字单位为 km。

类似地, 将 2041-2050 年 5 种针茅的可适应分布气候区竞争预测结果作为相应 5 种针茅的原始分布, 可获得 2091-2100 年大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅最适应、次适应和可适应分布气候区竞争预测图(见图 3)。

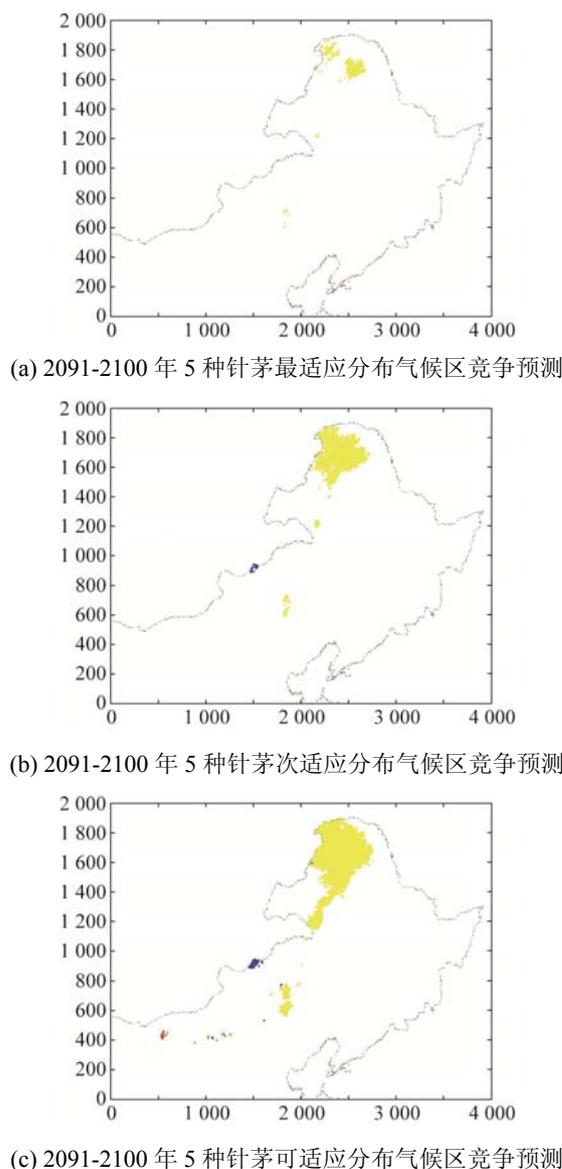


图 3 2091-2100 年 5 种针茅分布气候区竞争预测图

## 4 结果分析

从图 2 可以看到东北地区大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅在 2041-2050 年的最适应、次适应和可适应分布区域竞争预测图的变化具有以下特征:

(1) 从竞争的角度看, 由于大针茅、贝加尔针茅和克氏针茅的分布气候区互相毗邻, 而克氏针茅、短花针茅与小针茅的气候区又互相毗邻, 因此大针茅、贝加尔针茅和克氏针茅相互间存在竞争, 而克氏针茅、短花针茅和小针茅相互间存在竞争, 其中大针茅、贝加尔针茅的竞争较为激烈;

(2) 从 5 种针茅的最适应、次适应和可适应分布区域竞争预测图的动态角度来看: 除短花针茅外, 它们的分布区域都有向北漂移现象, 且大针茅、贝加尔针茅和小针茅都向东北方向漂移, 而克氏针茅既有向东北方向, 也有向西北方向漂移。这些现象与文献[20, 21, 26]的结论一致。同时短花针茅的 3 个竞争分布区域比较稳定, 仍在原分布区内;

(3) 从预测的结果看, 小针茅和短花针茅在 2041-2050 年的最适应分布气候区域、次适应分布气候区域和可适应分布气候区域竞争预测相对于它们的原分布区域减小都非常的明显。进一步, 给出 5 种针茅物种的最适应、次适应和可适应分布区内分布的点数, 以及 1981-2000 年调查分布点数的统计表如表 2 所示, 其中表 2 中每个点数对应  $1 \text{ km}^2$  的面积。

表 2 东北地区 2041-2050 年 5 种针茅竞争的最适应、次适应和可适应分布区内点数统计表

物种	原调查分布区	最适应分布区	次适应分布区	可适应分布区
大针茅	59 835	7 841	94 167	158599
贝加尔针茅	68 113	164 537	289 299	447 218
克氏针茅	33 572	11 997	16 586	96 852
小针茅	50 086	0	291	13 641
短花针茅	12 570	1 338	5 266	7 921

从图 3 可以看到东北地区大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅在 2091-2100 年的最适应、次适应和可适应竞争分布预测图的变化具有以下特征:

(1) 从总体上看: 2091-2100 年东北地区 5 种针茅中, 除贝加尔针茅外, 其它针茅都只有一些零星的分布, 其中小针茅在图 3 的 3 个图中都无预测点存在; 克氏针茅和短花针茅在图 3 的 3(a)和 3(b)中都无预测点存在, 大针茅在图 3(a)中也无预测点存在。进一步, 给出东北地区 2091-2100 年 5 种针茅的最适应、次适应和可适应分布区内分布的点数的统计表如表 3 所示。与 2041-2050 年 5 种针茅的可适应分布区域, 它们的最适应、次适应和可适应竞争分布预测区域减小都非常的显著。

表 3 东北地区 2091-2100 年 5 种针茅竞争的最适应、次适应和可适应分布区内点数统计表

物种	最适应分布区	次适应分布区	可适应分布区
大针茅	0	525	2 658
贝加尔针茅	9 425	70 017	162 133
克氏针茅	0	0	210
小针茅	0	0	0
短花针茅	0	0	347

(2) 从 5 种针茅的最适应、次适应和可适应分布区域竞争预测图的动态角度来看: 只有贝加尔针茅向东北方向漂移, 其它 4 类针茅无变化趋势。

为了能更清楚显示物种竞争与气候变化对针茅分布预测的影响, 以下以东北地区 5 种针茅的可适应气候分布区预测为例进行进一步分析。为此, 将算法 A 中 Step3 修改为仅在单物种  $i$  的存留区域  $S_i$  基础上扩展, 并进行适应性检验。同时略去物种竞争带来的选择性判别, 如此可获得东北地区大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅在 2041-2050 年和 2091-2100 年的单物种可适应气候分布区预测点数统计如表 4 所示。

表 4 东北地区 2041-2050 年和 2091-2100 年  
5 种针茅的单物种可适应分布区内点数统计表

物种	2041-2050 年可适 应分布区	2091-2100 年可适 应分布区
大针茅	410 781	2 781
贝加尔针茅	557 464	162 253
克氏针茅	227 542	237
小针茅	23 337	0
短花针茅	20 761	348

根据表 2 和 4, 可从气候变化和物种间的竞争两个方面来解释其产生的原因:

首先, 在 2041-2050 年贝加尔针茅的可适应竞争分布预测的面积占原分布区域面积的百分比是 656.58%。由于它的百分比大于 100%, 此表明气候变化有利于贝加尔针茅在东北地区生存。而可适应竞争分布预测的面积占原分布区域面积的百分比比它的单物种预测的面积占原分布区域面积的百分比(注: 818.44%)减少了 19.78%, 此表明在讨论的东北地区的这 5 种针茅中, 贝加尔针茅具有最强的竞争力。因此, 气候变化和种间竞争是影响贝加尔针茅在 2041-2050 年分布预测的主要因素;

其次, 在 2041-2050 年短花针茅的可适应竞争分布预测的面积占它的原分布区域面积的百分比是 63.02%, 即百分比小于 100%。同时其单物种可适应分布预测的面积占它们的原分布区域面积的百分比为 165.16%, 其大于 100%, 这表明气候变化有利于短花针茅在东北地区生存。而短花针茅的可适应竞争分布预测的面积占它的原分布区域面积的百分比比它的单物种预测的面积占原分布区域面积的百分比减少了 63.66%。而 2041-2050 年克氏针茅、短花针茅和小针茅相互间存在竞争, 此表明竞争机制也是短花针茅的竞争预测影响的重要原因。因此, 气候变化和种间竞争是影响短花针茅在 2041-2050 年分布预测的主要原因。

第三, 在 2041-2050 年大针茅和克氏针茅的可适应竞争分布预测的面积占它们的原分布区域面积的百分比分别是 265.06%和 288.49%。由于它们的百分比都大于 100%, 此表明气候变化有利于大

针茅和克氏针茅在东北地区生存。而 2041-2050 年大针茅和克氏针茅的可适应竞争分布预测的面积占它们的原分布区域面积的百分比比它们的单物种预测的面积占原分布区域面积的百分比减少得较大(即分别为 61.39%和 57.44%)。同时 2041-2050 年大针茅、贝加尔针茅和克氏针茅相互间存在竞争, 且克氏针茅、短花针茅和小针茅相互间存在竞争, 其中大针茅、贝加尔针茅的竞争较为激烈。因此, 种间竞争是影响大针茅和克氏针茅在 2041-2050 年分布预测的主要因素;

最后, 在 2041-2050 年小针茅的可适应竞争分布预测的面积占它们的原分布区域面积的百分比是 27.24%, 此小于 100%。同时单物种可适应分布预测的面积占它原分布区域面积的百分比为 46.59%, 此百分比也小于 100%。此表明气候变化不利于小针茅在东北地区生存。而小针茅的可适应竞争分布预测的面积占它原分布区域面积的百分比比它的单物种预测面积占原分布区域面积的百分比减少得较大(即 41.53%)。同时克氏针茅、短花针茅和小针茅相互间存在竞争。此表明竞争机制也是造成小针茅的竞争预测影响的重要原因之一。因此气候变化和种间竞争是影响小针茅的分布预测的主要原因。

综上, 到 2041-2050 年, 气候变化和种间竞争是影响东北地区贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 3 种针茅竞争分布预测的主要原因, 而种间竞争是影响东北地区大针茅和克氏针茅的竞争分布预测的最重要原因。

类似地, 从表 3 和 4 可以看到: 到 2091-2100 年, 东北地区小针茅的可适应分布气候区的单物种与竞争分布预测数量相等, 即为 0, 而短花针茅和克氏针茅的数量略有下降, 即分别从 348 减少到 347、从 237 减少到 210。此表明: 克氏针茅与短花针茅之间没有竞争或竞争较弱, 而它们与小针茅没有竞争; 进而克氏针茅与大针茅之间也没有竞争或竞争性较弱。因此只有大针茅与贝加尔针茅之间存在竞争。进一步分析如下:

(1) 由于在 2091-2100 年大针茅、短花针茅和克氏针茅的可适应竞争分布预测的面积占它们原分布区域面积的百分比分别是 4.65%、2.76%和 0.63%，即它们的值都接近于 0，相应的小针茅的百分比就是 0。因此，气候变化不利于 2091-2100 年短花针茅、克氏针茅和小针茅在东北地区的生存；

(2) 由于在 2091-2100 年贝加尔针茅的可适应分布气候区域竞争预测的面积占原分布区域面积的百分比是 238.04%。由于其值是大于 100%，因此气候变化仍有利于 2091-2100 年贝加尔针茅在东北地区生存；同时，贝加尔针茅的可适应单物种分布预测与竞争分布预测的面积占原分布区域面积的百分比之差是 0.18%，此表明大针茅与贝加尔针茅之间竞争较弱。

综上，到 2091-2100 年，气候变化是影响我国东北地区大针茅、贝加尔针茅、克氏针茅、小针茅和短花针茅等 5 种针茅分布预测的最重要原因。

## 5 结论

在 1981-2000 年间东北地区针茅物种小针茅、大针茅、克氏针茅、短花针茅、贝加尔针茅实际分布区调查数据与分布区气候的基础上，以及 2041-2050 年和 2091-2100 年的气候预测数据基础上，结合针茅类生物学与生态学特征，提取影响针茅物种的 12 个气候因子指标。在此基础上，引入 Gauss 竞争排斥原理，采用严格的统计分析和数据处理理论与方法，建立起针茅分布竞争的随机预测数学模型，并进行了相应的算法研究。在 ArcGIS9.3 界面下，利用 MATLAB 进行程序设计与运行，获得了东北地区针茅在 2041-2050 年和 2091-2100 年的最适应、次适应和可适应竞争分布区域预测图。进一步分析研究表明：从中期(注：指 2041-2050 年)结果看，气候变化和种间竞争是影响东北地区贝加尔针茅、小针茅和短花针茅等 3 种针茅竞争分布预测的主要原因，而种间竞争是影响东北地区大针茅和克氏针茅的竞争分布预测的最重要原因；从长期(注：指 2091-2100 年)结果看，气候变化是影

响东北地区 5 种针茅竞争分布预测的最重要原因。这些研究方法具有一般性，对于物种多样性及自然系统环境保护等具有指导意义。

本文仅考虑影响物种分布的气候因子，没有涉及物种生长的生态系统环境因素，如土壤温度、土壤水分指、土壤有机质、N、P 和 K 的含量、土壤粗砂、细砂、和黏粒含量、土层厚度以及 PH 值等一系列因素相关<sup>[27-28]</sup>，因此模型预测结果具有不确定性。更精确的结果需要引入这些物种生长的生态系统环境因素。这是下一步需要解决的问题。

## 参考文献：

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis-Summary for policymakers of the working group I report [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability-Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Maurer B A. Biogeography: big thinking [J]. Nature (S0028-0836), 2002, 415: 489-491.
- [4] Erasmus B F N, Vanjaarsveld S A, Chown L S, et al. Vulnerability of South African animal taxa to climate change [J]. Global Change Biology (S1354-1013), 2002, 8(7): 679-693.
- [5] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling (S0304-3800), 2006, 190(3-4): 231-259.
- [6] 张庆, 牛建明, 董建军. 内蒙古中西部草原区五种针茅的遗传多样性研究 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 306-311.
- [7] 郭平, 张卓, 周婵, 等. 呼伦贝尔草原大针茅和贝加尔针茅的生殖生长规律 [J]. 草地学报, 2011, 19(3): 381-387.
- [8] 赵念席, 高玉葆, 王金龙, 等. 大针茅种群 RAPD 多样性及其与若干生态因子的相关关系 [J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1312-1319.
- [9] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155-1164.
- [10] 刘景玲, 高玉葆, 王金龙, 等. 克氏针茅等位酶分析及

- 其与气候因子的相关关系 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 217-221-234.
- [11] 史激光. 典型草原区 3 种牧草生育规律及物候期气象指标 [J]. 草业科学, 2011, 28(10): 1855-1858.
- [12] 韩国栋. 降水量和气温对小针茅草原植物群落初级生产力的影响 [J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2002, 33(1): 83-88.
- [13] 张昊, 李鑫, 姜凤和, 等. 水分对克氏针茅和冷蒿生长的影响 [J]. 草地学报, 2005, 13(2): 106-110.
- [14] 蒙荣, 慕宗杰, 孙熙麟, 等. 短花针茅荒漠草原群落优势种群空间格局分析 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(1): 65-70.
- [15] 张庆, 牛建明, B Alexander, 等. 内蒙古短花针茅群落数量分类及环境解释 [J]. 草业学报, 2012, 21(1): 83-92.
- [16] 刘珏宏, 高慧, 张丽红, 等. 内蒙古锡林郭勒草原大针茅-克氏针茅群落的种间关联特征分析 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (9): 1016-1024.
- [17] 袁文平, 周广. 中国东北样带三种针茅草原群落初级生产力对降水季节分配的响应 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 605-609.
- [18] Forsman J T, Mönkköönen M. The role of climate in limiting European resident bird populations [J]. Journal of Biogeography (S0305-0270), 2003, 30(1): 55-70.
- [19] Luoto M, Pöyry J, Heikkinen R K, et al. Uncertainty of bioclimatic envelope models based on the geographical distribution of species [J]. Global Ecology and Biogeography (S1466-822X), 2005, 14(6): 575-584.
- [20] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1091-1105.
- [21] 张雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等. 气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图—以油松为例 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5749-5761.
- [22] Graham C H, Elith J, Hijmans R J, et al. The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models [J]. Journal of Applied Ecology (S0021-8901), 2008, 45(1): 239-247.
- [23] 吴建国, 吕佳佳. 气候变化对大熊猫分布的潜在影响 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(12): 168-177.
- [24] 晏寒冰, 彭丽潭, 唐旭清. 基于气候变化的东北地区森林树种分布预测建模与影响分析 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 132-139.
- [25] 王昱生, 赵妮珊, 徐中儒, 等. 中国东北部贝加尔针茅草原生产量与生态因素的关系及其预测模型 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(3): 286-295.
- [26] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature (S0028-0836), 2003, 421: 37-42.
- [27] 冯天龙, 刘恩举, 孙国斌. 根系温度对植物的影响(I)-根温对植物生长及光合作用的影响 [J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(3): 63-69.
- [28] 杨永兴, 刘长娥, 杨杨, 等. 长江河口九段沙下沙湿地植物 N、P、K 的分布特征与季节动态 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1277-1288.

(上接第 955 页)

- [2] Kim D, Kwon B. A novel equivalent circuit model of linear induction motor based on finite element analysis and its coupling with external circuits [J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2006, 42(10): 3407-3409.
- [3] 龙遐令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法 [M]. 北京, 科学出版社, 2006.
- [4] 王磊杰, 张鸣, 朱煜. 基于Modelica的直线电机控制系统建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(8): 1737-1750. (Wang Leijie, Zhang Ming, Zhu Yu. Research of linear motor control system modeling and simulation based on modelica [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2012, 24(8): 1737-1750.)
- [5] 鲁军勇, 马伟明, 孙兆龙, 等. 多段初级直线感应电机静态纵向边端效应研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 95-101.
- [6] Bazghaleh A Z, Naghashan M R, Meshkatodini M R. Optimum design of single-sided linear induction motors for improved motor performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2010, 46(11): 3939-3947.
- [7] 鲁军勇, 马伟明, 许金. 高速长定子直线感应电动机的建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 89-94.
- [8] 王江波, 李耀华, 严陆光. 长初级双边直线电机高性能控制策略 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 126-131.
- [9] 邓江明, 陈特放, 唐建湘, 等. 单边直线感应电机动态最大推力输出的滑差频率优化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 123-130.
- [10] 许金, 马伟明, 鲁军勇. 无槽双边长定子直线异步电动机二维磁场分布及电磁力计算 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 38-44.
- [11] Kang G, Nam K. Field-oriented control scheme for linear induction motor with the end effect [J]. IEE Proceedings—Electrical Power Applications, (S1083-4435), 2005, 152(6): 1565-1572.