

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2021.10022

曹倩, 高庆波, 郭万军, 张毓, 王智华, 马小磊, 张发起, 陈世龙. 基于 MaxEnt 模拟人类活动与环境因子对青藏高原特有植物祁连山獐牙菜潜在分布的影响[J]. 植物科学学报, 2021, 39(1): 22-31

Cao Q, Gao QB, Guo WJ, Zhang Y, Wang ZH, Ma XL, Zhang FQ, Chen SL. Impacts of human activities and environmental factors on potential distribution of *Swertia przewalskii* Pissjauk., an endemic plant in Qing-Tibetan Plateau, using MaxEnt[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(1): 22-31

## 基于 MaxEnt 模拟人类活动与环境因子对青藏高原特有植物祁连山獐牙菜潜在分布的影响

曹倩<sup>1,2</sup>, 高庆波<sup>1</sup>, 郭万军<sup>3</sup>, 张毓<sup>4,5,6</sup>, 王智华<sup>1,2</sup>, 马小磊<sup>1,2</sup>, 张发起<sup>1</sup>, 陈世龙<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所生物适应与进化重点实验室, 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 青海省互助土族自治县林业站, 青海互助 810500; 4. 祁连山国家公园青海省管理局, 西宁 810003;  
5. 祁连山国家公园青海省研究中心, 西宁 810003; 6. 祁连山国家公园长期科研基地, 西宁 810003)

**摘要:** 以青藏高原特有植物祁连山獐牙菜(*Swertia przewalskii* Pissjauk.) 为材料, 基于该物种 18 个种群分布点及 8 个生物气候变量、海拔变量以及人类活动强度变量, 运用最大熵模型(MaxEnt) 和 ArcGIS 技术分别构建当前气候情景下及人类活动影响下祁连山獐牙菜的适宜生境预测模型, 研究人类活动及自然环境变量对祁连山獐牙菜空间分布的影响。结果显示, 人类活动影响下的训练集和测试集的 AUC 值均小于无人类活动干扰的 AUC 值, 人类活动与祁连山獐牙菜分布呈负相关。限制祁连山獐牙菜分布的主要变量为海拔、等温性、人类活动足迹指数及平均温度日较差。当前气候情景下祁连山獐牙菜的最适宜生境占祁连山国家公园青海片区总面积的 36.6%, 有利于该物种的保护和恢复, 而位于门源县和祁连县保护区内一般控制区的潜在生境受到人为干扰的可能性较大, 应加强关注和保护。

**关键词:** 祁连山獐牙菜; 最大熵模型(MaxEnt); 潜在分布区; 人类活动; 青藏高原; 祁连山国家公园

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)01-0022-10

### Impacts of human activities and environmental factors on potential distribution of *Swertia przewalskii* Pissjauk., an endemic plant in Qing-Tibetan Plateau, using MaxEnt

Cao Qian<sup>1,2</sup>, Gao Qing-Bo<sup>1</sup>, Guo Wan-Jun<sup>3</sup>, Zhang Yu<sup>4,5,6</sup>, Wang Zhi-Hua<sup>1,2</sup>,  
Ma Xiao-Lei<sup>1,2</sup>, Zhang Fa-Qi<sup>1</sup>, Chen Shi-Long<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huzhu County Forestry Station of Qinghai Province, Huzhu, Qinghai 810500, China; 4. Qilianshan National Park Bureau of Qinghai Province, Xining, 810003, China; 5. Research Center of Qilianshan National Park Bureau of Qinghai Province, Xining, 810003, China; 6. Long-Term Research Center of Qilianshan National Park, Xining 810003, China)

**Abstract:** In this paper, the distribution of potentially suitable habitat of *Swertia przewalskii* Pissjauk., an endemic and endangered plant in the Qing-Tibetan Plateau, was studied to provide a scientific basis for effective conservation. This study was based on 18 occurrence records and eight environmental variables, including human activity, bioclimate, and altitude. We used the maximum entropy model and ArcGIS spatial analysis to construct a suitable

收稿日期: 2020-05-18, 修回日期: 2020-07-14。

基金项目: 青海省高端创新人才千人计划; 青海省林业和草原局 2019 年度第二批林业改革发展资金湿地生态效益补助补偿资金。

This work was supported by grants from the Qinghai High-End Innovative Talents Thousands of People Plan, Qinghai Forestry and Grassland Bureau of the Second Forestry Development and Reform Fund on Wetland Ecological Compensation (2019).

作者简介: 曹倩(1977-), 女, 博士研究生, 研究方向为高原植物系统发育(E-mail: caoqian@nwipb.cas.cn)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: slchen@nwipb.cas.cn)。

habitat prediction model for *S. przewalskii* under the influence of modern climate scenarios and human activities and analyzed the influences of human activities and natural environmental factors, respectively. Results showed that the AUC of the test set under human activity interference was lower than that under no human activity interference. Human activities exerted negative impact on the potential distribution of *S. przewalskii*. Altitude, isothermality, human footprint index, and mean diurnal range were the main environmental factors influencing the distribution of *S. przewalskii*. At present, the most suitable habitat included 36.6% of the Qilianshan National Park area (Qinghai), which should benefit species conservation. However, the potential habitat in the utilization zones of the Qilian and Menyuan counties may be disturbed by human activities. We suggest policy makers focus greater attention on these utilization zones and increase conservation efforts.

**Key words:** *Swertia przewalskii*; MaxEnt; Potential distribution; Human activities; Qing-Tibetan Plateau; Qilianshan National Park

生物多样性是大自然的宝贵财富,也是人类赖以生存和发展的基础<sup>[1]</sup>。然而过去几百年来,随着人口增长、科技发展以及人类对自然资源的快速消耗,人类活动对生物多样性的影响愈发深刻。生境的缩减、破碎化和对生物资源的剥削改变了物种的分布格局,威胁到物种的生存。因此,研究物种分布格局对人类活动的响应,能帮助我们理解物种的生存现状和胁迫因素,有利于制定科学的保护措施<sup>[2]</sup>。

祁连山獐牙菜(*Swertia przewalskii* Pissjauk.) 隶属于龙胆科獐牙菜属,是青藏高原的特有植物<sup>[3]</sup>。据青海植物志记载,该物种仅分布于青藏高原东部祁连山地区的高寒草甸、灌丛和沼泽地<sup>[4]</sup>。藏族传统医学认为祁连山獐牙菜具有清热祛湿、消炎利胆的功效,被用于治疗肝病<sup>[5,6]</sup>。近几十年来由于人类活动的影响,祁连山獐牙种群数量和分布面积较历史时期大为缩减<sup>[7]</sup>。为了摸清祁连山獐牙菜的分布格局,2019年本课题组依托祁连山国家公园生物多样性本底调查,对祁连山獐牙菜开展野外调研,仅发现了8个相互隔离的小种群。根据IUCN红色名录的划分等级和标准,祁连山獐牙菜符合濒危标准<sup>[8]</sup>,对其开展保护已迫在眉睫。

野外调查获得的数据不足以反映物种的整体分布格局。近年来,最大熵模型(MaxEnt)被广泛用于野生动植物潜在生境的预测,该方法在物种分布点较少的情况下也能获得较准确的预测结果<sup>[9]</sup>,适用于濒危物种的潜在生境预测及保护措施制

定<sup>[10-12]</sup>,草地资源管理规划<sup>[13]</sup>,评估入侵物种传播范围及预警<sup>[14]</sup>,以及分析气候变化对植物分布的影响<sup>[15]</sup>等。在此,我们以祁连山獐牙菜为对象,选取气候和海拔环境变量预测该物种的适宜生境,并使用人类活动因子作为对比变量,采用MaxEnt模型和ArcGIS空间分析技术预测祁连山獐牙菜的当前潜在分布区。通过分析祁连山獐牙菜潜在适宜分布格局及其与环境因子的关系,研究其在祁连山地区的潜在适宜分布范围受人类活动影响的变化格局,以期对祁连山国家公园开展该物种的保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 物种分布数据来源

本研究所使用的祁连山獐牙菜分布数据主要来自文献<sup>[7]</sup>、中国数字植物标本馆(CVH)(<http://www.cvh.ac.cn/>),以及野外实地考察(2019年7-8月;GPS型号Garmin etrex 309x)。共获得34条地理分布信息,除去重复和不确定的信息后,共获得18个有效分布点数据(表1,图1)。然后按照MaxEnt运行要求整理成CSV格式文件。

### 1.2 数据来源

本研究采用3类环境变量:(1)生物气候变量,来源于Worldclim数据集,该数据集分辨率为30",由19个降水量、温度的极值和变化范围的变量构成<sup>[16]</sup>(附录1<sup>1)</sup>);(2)中国海拔高度(DEM)空间分布数据,精度250m,来源于中国科学院地

1) 如需查阅附录内容请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>)查看本期文章附录。

表 1 祁连獐牙菜 18 个种群的地理信息  
Table 1 Basic information on 18 *Swertia przewalskii* populations

种群 Population	地点 Site	经纬度 Latitude/Longitude	海拔 Altitude ( m)	来源 Source
1	青海省海北州门源县磨石大板山 Moshidaban Mountain, Menyuan, Haibei, Qinghai	37.15°N, 101.90°E	3651	CVH
2	青海省海北州门源县种马场 Machang, Menyuan, Haibei, Qinghai	37.38°N, 101.62°E	2864	CVH
3	青海省西宁市大通县宝库乡 Baoku, Xining, Qinghai	37.28°N, 101.27°E	3303	CVH
4	青海省海北州门源县浩门镇 Haomen, Haibei, Qinghai	37.34°N, 101.59°E	3210	CVH
5	青海省海北州祁连县牛心山 Niuxinshan Mountain, Qilian, Haibei, Qinghai	38.11°N, 100.24°E	4061	CVH
6	青海省海北州祁连县野牛沟乡 Yeniuogou, Qilian, Haibei, Qinghai	38.56°N, 99.26°E	3926	CVH
7	青海省海西州木里镇 Muli, Haixi, Qinghai	38.15°N, 99.19°E	4049	CVH
8	青海省海北州祁连县默勒乡 Molu, Qilian, Haibei, Qinghai	37.79°N, 100.56°E	3685	CVH
9	青海省玉树州称多县歇武镇 Xiewu, Chengduo, Yushu, Qinghai	33.07°N, 97.40°E	4739	CVH
10	甘肃省武威市天柱县夏玛林场 Xiama, Tianzhu, Wuwei, Gansu	37.34°N, 103.13°E	2785	CVH
11	青海省海北州祁连县八宝镇青羊沟 Qingyanggou, Babao, Qilian, Haibei, Qinghai	38.15°N, 100.52°E	3654	2019 年野外调研
12	青海省海北州祁连县八宝镇小八宝河 Xiaobabaohe, Babao, Qilian, Haibei, Qinghai	38.00°N, 100.35°E	3209	2019 年野外调研
13	青海省海北州祁连县默勒乡途中 Qilian to Mole, Haibei, Qinghai	37.74°N, 100.74°E	3439	2019 年野外调研
14	青海省海北州祁连县默勒乡途中 Qilian to Mole, Haibei, Qinghai	37.93°N, 100.34°E	3762	2019 年野外调研
15	青海省海北州祁连县野牛沟乡边麻沟 Bianmagou, Yeniuogou, Qilian, Haibei, Qinghai	38.60°N, 99.47°E	4132	2019 年野外调研
16	青海省西宁市大通县大阪山 Dabanshan Mountain, Datong, Xining, Qinghai	37.36°N, 101.37°E	3717	2019 年野外调研
17	青海省海北州门源县海北生态监测站 Ecological Monitoring Station, Menyuan, Haibei, Qinghai	37.61°N, 101.31°E	3211	2019 年野外调研
18	青海省海北州祁连县峨堡镇 Ebo, Qilian, Haibei, Qinghai	38.08°N, 100.91°E	3283	2019 年野外调研

Note: CVH, Chinese Virtual Herbarium.

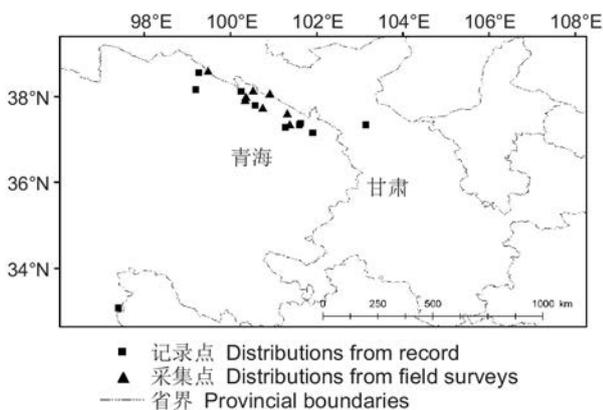


图 1 祁连獐牙菜 18 个居群分布点的地理位置  
Fig. 1 Geographical locations of 18 populations of *Swertia przewalskii*

理科学与资源研究所 (<http://www.gscloud.cn>) ; (3) 人类活动强度数据 (Human footprint index), 来源于国际地球科学信息网络中心 (CIESIN), 此数据由人类土地利用、基础设施建设、人口密度、夜间灯光数据、公路、铁路等 8 个全球数据层经过再赋值和叠加生成, 分值越高代表该空间上人类活动强度越大<sup>[17]</sup> (附录 2<sup>2)</sup>。

### 1.3 数据处理

利用 Arcmap10.2 软件 (美国 Esri 公司) 对人类活动数据进行坐标与格式转换处理, 然后根据中国省级行政边界数据 (中国科学院地理科学与资源研究所) 对全球人类足迹数据、全球生物

2) 如查阅附录内容请登录《植物科学学报》网站 (<http://www.plantscience.cn>) 查看本期文章附录。

气候数据和中国海拔数据进行影像配准和裁剪。所有数据统一后的精度为 1 km, 坐标系为 WGS1984。

为了避免建模过程中变量之间存在自相关和多重线性重复等问题, 使用 R 语言“MaxEntVariableSelection”函数包<sup>[18]</sup>, 用 Spearman 相关系数对 19 个生物气候变量(附录 1<sup>1)</sup>) 进行处理, 剔除模型预测贡献率小于 5% 的因子, 并设置相关系数为 0.8, 对余下的因子进行单因子建模, 保留相关系数 < 0.8 的环境因子, 最终确定 6 个生物气候因子变量参与建模, 分别是: Bio1 年平均气温; Bio2 平均温度日较差; Bio3 等温性; Bio14 最干月降水量; Bio15 降水量变异系数; Bio19 最冷季度降水。

#### 1.4 模型构建

将祁连獐牙菜种群的地理分布数据、海拔和气候变量, 以及人类活动变量导入 MaxEnt 软件(3.3.3k)<sup>[19]</sup>进行模拟。采用接受者操作特性(receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析法进行模型精度检验, 分析每个变量对祁连獐牙菜潜在分布区的贡献率。参照朱耿平等<sup>[20]</sup>的方法, 采用阈值型(threshold features) 和片段化(hinge features) 作为特征参数, 建立环境变量响应曲线。其余参数使用 MaxEnt 软件的默认参数<sup>[19]</sup>。随机选择 75% 的祁连獐牙菜分布点作为训练集, 剩余 25% 的分布点作为测试集。第一次预测只使用环境变量, 第二次预测同时使用环境变量及人类足迹变量。

将两次分布预测结果分别导入 Arcmap10.2 中进行可视化处理, 使用空间分析工具重新分类的自然间断法, 将分布区划分为高适生区、低适生区和非适生区。然后计算各个分区的面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型评价及环境变量的重要性

MaxEnt 预测结果显示, 无人类活动影响下训练集的 AUC 值为 0.987, 测试集的 AUC 值为 0.988; 有人类活动影响下训练集和测试集的 AUC 值均为 0.95。AUC 值均处于 0.9 ~ 1.0 区间, 表明 MaxEnt 模型预测结果可靠<sup>[19]</sup>。

MaxEnt 软件利用刀切法比较每个变量对最大熵模型预测结果的贡献率来判断变量的重要性, 贡

献率大的变量为影响物种分布的主要环境变量<sup>[19]</sup>。根据 MaxEnt 软件的运算结果(图 2), 无人类活动干扰下, 影响该物种潜在分布的环境因子依次为海拔(36.9%)、等温性(27.2%)、平均温度日较差(20.9%)、最冷季度降水量(6%)、最干月降水量(4.5%)、降水量变异系数(4.1%) 和年平均气温(0.3%)。其中海拔、等温性和平均温度日较差的贡献率最大, 它们的累计贡献率之和达到 91.1%, 是影响祁连獐牙菜分布的主要环境变量。引入人类足迹指数后, 影响祁连獐牙菜潜在分布的变量依次为海拔(31.9%)、等温性(25.2%)、人类足迹指数(16.3%)、平均温度日较差(14.1%)、最冷季度降水量(5.9%)、最干月降水量(3.5%)、降水量变异系数(2.6%) 和年平均气温(0.4%)。贡献率最大的变量依次是海拔、等温性、人类足迹指数和平均温度日较差, 这 4 个变量的累计贡献率之和达到 87.9%, 表明它们是影响祁连獐牙菜分布的主要环境变量。

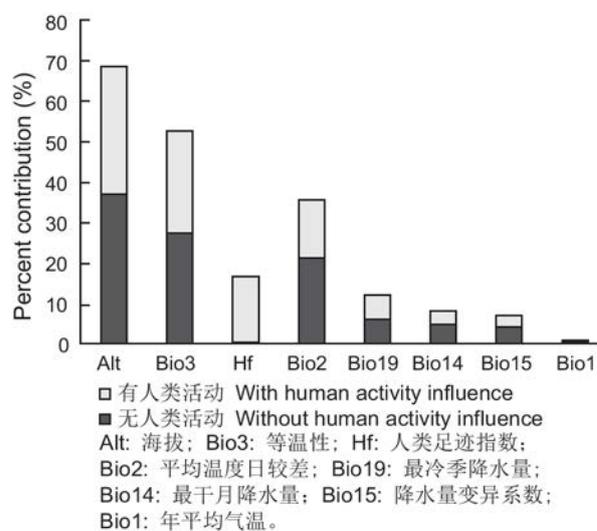


图 2 环境变量对祁连獐牙菜生境适宜性的贡献率比较  
Fig. 2 Comparison of contribution rate of environmental variables to potential distribution of *Swertia przewalskii*

利用 MaxEnt 模型绘制人类活动情景下 4 个主要环境变量的响应曲线(图 3)。从图 3 可看出, 适宜祁连獐牙菜生长的海拔范围为 1500 ~ 5500 m(峰值为 3000 ~ 4000 m); 等温性为 27 ~ 35(峰值为 32 ~ 35); 平均温度日较差为 8℃ ~ 14℃(峰值为 12℃ ~ 13℃); 祁连獐牙菜的分布概率在人类足迹指数 0 ~ 5 之间上升, 达到顶点后略有下降。

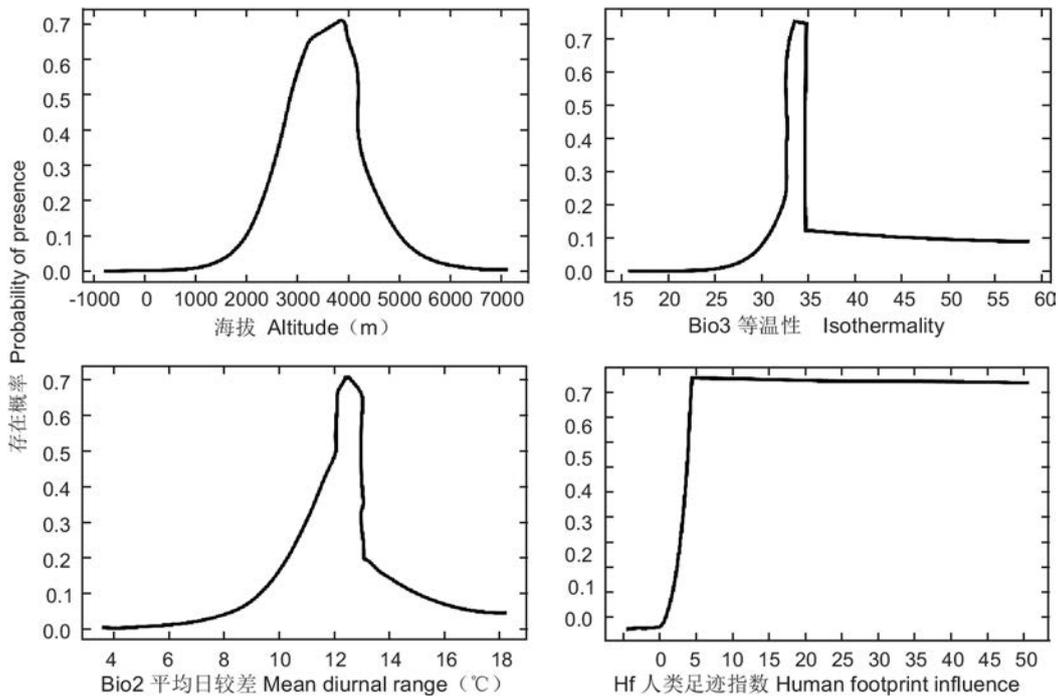


图 3 祁连獐牙菜潜在分布对环境变量的响应曲线

Fig. 3 Response curve of potential distribution of *Swertia przewalskii* against environmental factors

进一步将 MaxEnt 软件生成的祁连獐牙菜潜在分布图层数据导入 Arcmap10.2 进行处理,用“空间分析工具”的“提取”功能提取祁连獐牙菜高适生区范围数据和低适生区范围数据,对 4 个主要环境变量数据进行“重分类”处理(“自然间断分类”),然后分别将适生范围数据与 4 个主要环境变量数据导入地图中,由适生区分布图层与环境变量图层重叠的区域即为祁连獐牙菜适宜分布的环境变量数值范围。分析结果显示,祁连獐牙菜潜在分布区的海拔适宜范围为 1446 ~ 5062 m,最适范围为 3010 ~ 4490 m;等温性的适宜范围为 29 ~ 36,最适范围为 32 ~ 36;平均温度日较差的范围为 8.2°C ~ 13.9°C,最适范围 10.6°C ~ 11.8°C;人类足迹指数范围为 3 ~ 18,最适区为 3 ~ 8。

## 2.2 祁连獐牙菜潜在分布区预测

预测结果显示,祁连獐牙菜的适宜分布区沿祁连山脉呈狭长带状分布(图 4),主要适宜分布区包括祁连山地区的黑河流域和大通河流域,此外,疏勒河和布哈河流域也存在少量适宜分布区。适生区大部分位于祁连山脉南侧的青海省境内,少量适生区位于祁连山北侧的甘肃省。本研究预测的祁连獐

牙菜潜在分布范围与其现存范围相符,并且在现有记录范围之外的青海省南部地区、西藏、新疆和四川也有零星潜在分布。

无人类活动影响下,祁连獐牙菜的适生区和低适生区面积分别为 48469 km<sup>2</sup>和 190644 km<sup>2</sup>(表 2),高适生区主要位于青海省的祁连县和门源县;低适生区包括青海省天峻县、德令哈市、大通县、刚察县和互助县,以及甘肃省的肃南县和民乐县(图 4: A)。人类活动影响下,祁连獐牙菜的适生区和低适生区面积分别为 37 ~ 635 km<sup>2</sup>和 124 ~ 149 km<sup>2</sup>(表 2),适生区主要位于青海省的祁连县和门源县。受人类活动影响而减少的适生区包括青海省天峻县、德令哈市和互助县,以及甘肃省的民乐县和肃南县(图 4: B,附录 3<sup>3)</sup>),其中,青海省高适生区与低适生区面积分别减少了 4915 km<sup>2</sup>和 6750 km<sup>2</sup>,甘肃省高适生区与低适生区面积分别减少了 4142 km<sup>2</sup>和 35 316 km<sup>2</sup>。

对比无人类活动和有人类活动两种模式下祁连獐牙菜的潜在分布区可见,前者潜在分布区比较连续(图 4: A),而后者比较破碎化(图 4: B)。从分布范围来看,无人类活动影响的适宜分布区位于

3) 如需查阅附录内容请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>) 查看本期文章附录。

34.46° ~ 39.69°N、96.26° ~ 104.27°E, 有人类活动影响的适宜分布区位于 36.36° ~ 39.68° N、95.22° ~ 102.79°E, 说明在人类活动影响下, 祁连獐牙菜的潜在分布区向西南偏移, 横向偏移距离约为 210 km, 纵向偏移距离约为 164 km。从分布面积来看, 人类活动影响下高适生区和低适生区的总面积减少了 32%, 表明人类活动与祁连獐牙菜的分布面积呈负相关。

人类活动影响下祁连獐牙菜在祁连山国家公园青海片区内的适生区面积为 10478 km<sup>2</sup>, 约占祁连山国家公园青海片区总面积的 66%。高适生区面积为 5888 km<sup>2</sup>, 其中祁连县核心保护区内面积最大, 为 2078 km<sup>2</sup>, 其次是祁连县和门源县一般控制区, 各有 1508 km<sup>2</sup>和 1172 km<sup>2</sup>。低适生区面积为 4591 km<sup>2</sup>, 以天峻县核心保护区内面积最多( 1466 km<sup>2</sup>), 其余各保护区内的分布面积大致相等( 表 3 图 4: C)。

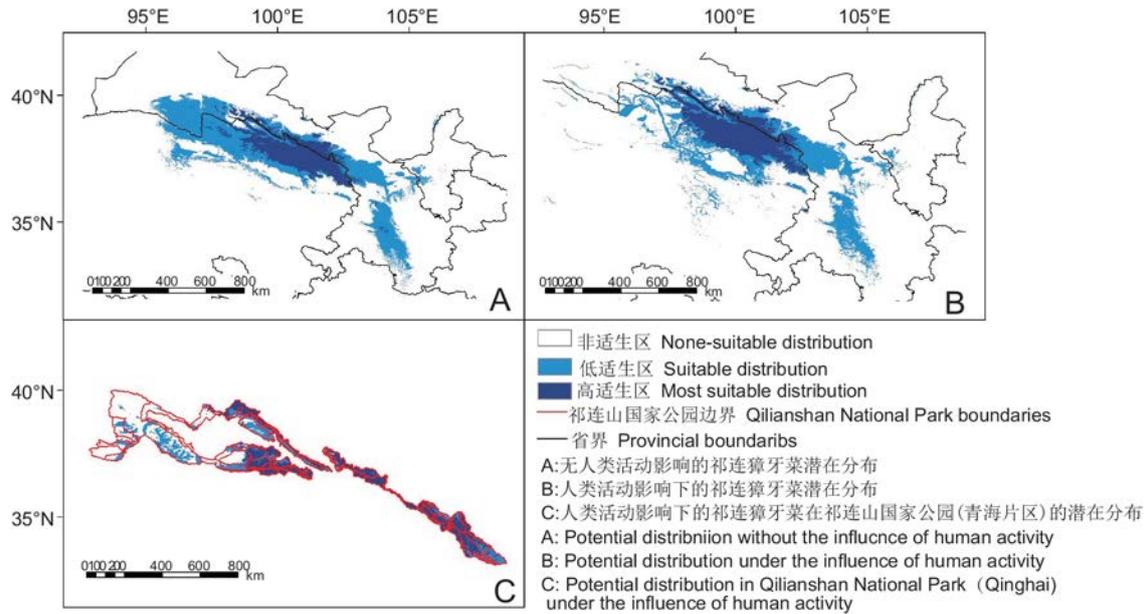


图 4 祁连獐牙菜的潜在分布  
 Fig. 4 Potential distribution of *Swertia przewalskii*

表 2 祁连獐牙菜在中国的适生面积(km<sup>2</sup>)  
 Table 2 Potentially suitable distribution of *Swertia przewalskii* in China

人类活动 Human activity	适生区面积 Most suitable distribution	低适生区面积 Suitable distribution	非适生区面积 Unsuitable distribution
有	37 635	124 149	94 766
无	48 469	190 644	9 399 359

表 3 人类活动影响下祁连獐牙菜在祁连山国家公园(青海片区)的潜在分布(km<sup>2</sup>)  
 Table 3 Potentially suitable distribution of *Swertia przewalskii* in Qilianshan National Park (Qinghai) under influence of human activity

保护区 Nature reserve	功能区划 Functional zone	保护区面积 Area of functional zone	高适生区面积 Most suitable distribution	低适生区面积 Suitable distribution
祁连县 Qilian	核心区 Key zone	25 011	20 789	372
	一般控制区 Utilization zone	30 843	15 078	11 364
门源县 Menyuan	核心区 Key zone	9390	6129	3261
	一般控制区 Utilization zone	16 881	11 715	5131
天峻县 Tianjun	核心区 Key zone	46 459	2621	14 658
	一般控制区 Utilization zone	14 419	2465	3495
德令哈市 Delingha	核心区 Key zone	12 825	7	2768
	一般控制区 Utilization zone	2566	75	1504

### 3 讨论

#### 3.1 环境变量的影响

本研究结果显示,影响祁连獐牙菜潜在分布的主要环境变量是海拔、等温性和平均温度日较差,表明祁连獐牙菜的生长、繁殖和扩散同时受海拔、等温性及日温差的制约,对生境有严格的选择。目前已知祁连獐牙菜的分布范围仅限于青藏高原地区,本研究预测的祁连獐牙菜的适生海拔为 3010 ~ 4490 m,与文献记载吻合,验证了祁连獐牙菜是适应于高寒气候的青藏高原特有种<sup>[4]</sup>。等温性反映了温度变化的迟早及幅度,祁连獐牙菜适生性较高的等温性指标为 32 ~ 36,平均日较差为 10.6℃ ~ 11.8℃,等温性的值随着适宜性的增加而上升,并且最适宜区较为狭窄,说明祁连獐牙菜适生区的日温差变化比年温差更加剧烈。这一结果符合祁连獐牙菜生境的气候特点,即热量低、年温差小而日温差大、寒冷半湿润型的高原气候<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 人类活动的影响

本研究所使用的人类足迹指数变量是由 8 个全球数据层经过再赋值和叠加生成的,包括:人口密度、铁路、主要公路、航运河流、海岸、夜间灯光(反映人口分布和定居点)、都市及土地利用类型,反映了人类活动的强度和空间分布<sup>[17]</sup>。考虑到本研究区域内不存在航运河流、海岸和都市,因而影响祁连獐牙菜分布的数据主要是人口密度、铁路、主要公路、夜间灯光和土地利用类型。

Xu 等<sup>[2]</sup>通过研究广布植物物种和狭域植物分布对人类活动的不同响应,发现人类活动对狭域物种的影响呈负相关(人类活动对龙胆目狭域分布物种的影响为 -0.29)。本研究显示,人类活动与祁连獐牙菜的潜在分布呈负相关,人类活动足迹减少了该物种 32% 的潜在分布,并使其分布区碎片化。祁连獐牙菜适宜分布在人类足迹指数较低的地区(最适区为 3 ~ 8),意味着该物种对人类活动的扰动非常敏感,此研究结果与 Xu 等<sup>[2]</sup>的结果相似。李永格等<sup>[22]</sup>对祁连山地区生态保护性研究发现,该地区人口密度为 10 人/km<sup>2</sup>左右,植被覆盖度高于 50%,且整体上没有大规模人类开发建设活动。本研究预测祁连獐牙菜的潜在分布地区主要位于祁连、门源和天峻,预测结果与之一致。

多数观点认为,即使在物种的适宜气候区,由于人类过度利用土地而导致的自然生境高度破碎化也会使物种扩张遭受阻碍<sup>[23]</sup>。在人类活动影响下,祁连獐牙菜的适生区在青海省天峻县、互助县和甘肃省民乐县、肃南县都有明显的缩减。除天峻县外,其他地区均有较强的人类活动。结合预测结果和野外观察,我们推测祁连獐牙菜潜在分布面积缩减的主要原因是当地城镇扩张、道路建设(公路和铁路)等对土地的破坏和生境的改变、以及由此带来的二次破坏(如利用道路获取、使用自然资源,旅游活动产生的污染和废弃物等)。虽然人类足迹指数对草地的影响赋值为 0,但是放牧是一项重要的人类活动(畜牧业是青藏高原重要的产业之一),因而放牧的影响不能忽视。

生境面积缩小会导致物种的种群和个体数量减少,并且小种群易受遗传漂变的影响<sup>[24]</sup>。谱系地理学研究发现,地理隔离造成祁连獐牙菜 4 个小种群间的有性生殖和基因流非常有限,导致该物种的遗传多样性降低<sup>[7]</sup>。祁连獐牙菜是严格的自交不亲和物种,自然结实必须依靠昆虫授粉<sup>[25]</sup>,而生境斑块之间距离增大将影响生物的传粉行为,从而进一步限制植物花粉和种子的扩散<sup>[26]</sup>。85% 的森林植物从原斑块到目标斑块的迁移速度很慢(每年只有几米),远低于设定气候变化条件下的迁移速度 3000 ~ 5000 m/年<sup>[27]</sup>。

在野外调研中我们发现,随着放牧活动增强,祁连獐牙菜的株高和丰度都有所下降。虽然祁连獐牙菜含有獐牙菜苦苷和龙胆苦苷等苦味极强的物质<sup>[5]</sup>,但牛羊并不回避采食。在放牧活动最强的一个分布点内遍布家畜粪便、蹄印和啃食痕迹,我们只发现了一株残余的祁连獐牙菜。在青海海北高寒草甸生态系统研究站内,由于严格实行禁牧管理,我们在此地发现了祁连獐牙菜丰度最大的一个种群。

调查中我们发现,在人类活动影响下位于青海省海西地区的祁连獐牙菜潜在分布面积大为减少,但是其残留的分布区呈现出沿河流分布(疏勒河和布哈河)的趋势(图 4: B)。我们推测,由于祁连獐牙菜喜湿,而盖因这些区域通常作为秋季牧场(10 - 12 月)或冬季牧场(1 - 6 月)使用,家畜采食祁连獐牙菜的果实后通过粪便传播种子,并在沿

河流迁徙过程中将种子带往别处,这一传播行为增加了局部地区祁连獐牙菜的种群丰度。有研究发现,放牧家畜对一些牧草种子有传播和萌发作用<sup>[28,29]</sup>,然而祁连獐牙菜种子能否通过家畜的粪便传播,还需要作进一步研究。

### 3.3 保护建议

我们野外调查发现,祁连獐牙菜栖息地包括高山流石滩草甸、沼泽化草甸、草甸及灌丛,多样化的生境说明祁连獐牙菜有较强的适应能力(附录4<sup>4)</sup>)。Zhang等<sup>[7]</sup>研究认为,祁连獐牙菜种群之间虽然相互隔离,但种群内部的遗传多样性较高。这意味着只要生境和气候条件适宜,祁连獐牙菜就具有较高的种群恢复能力。

祁连山国家公园(青海片区)66%的区域为祁连獐牙菜的适宜分布区,祁连山国家公园的保护措施将有利于该物种的保护与恢复。结合祁连獐牙菜在祁连山国家公园内的分布特点及国家现行的保护区管理政策<sup>[30,31]</sup>,我们提出以下建议:(1)基于祁连县保护区内祁连獐牙菜的潜在分布区面积最大,且与核心保护区高度重叠(高适生区占核心保护区的83%),建议在这些地区建立祁连獐牙菜的核心保护地,将该物种的栖息地完整地保护起来,并且核心保护区也将对祁连獐牙菜起到种质资源保存与辐射的作用。(2)基于天峻县核心保护区内有大面积的祁连獐牙菜低适生区,且天峻县与祁连县之间存在祁连獐牙菜的间断分布,在核心保护区实施严格的管理政策,将有助于祁连獐牙菜相互隔离的生境连接起来,促进种群间的有性生殖和基因交流。(3)基于祁连獐牙菜在祁连县与门源县的一般控制区内有较多分布,目前这些区域作为合理利用区与生态修复区来管理,受到人为干扰的可能性较大的现状,应予以更多关注与保护。建议在祁连县与门源县的一般控制区内进一步开展祁连獐牙菜的野外分布调查,并在相关村镇开展社区调研,了解当地居民对社区自然资源的使用方式。在此基础上,通过开展环境教育、科学传播,寻求可替代生计等措施,鼓励当地居民理解、支持并参与祁连獐牙菜的保护。

本研究基于地理分布信息、分布地海拔、生物气候、人类活动变量数据,对祁连獐牙菜的潜在适

生区进行了预测,探讨了其地理分布格局对环境变量以及人类活动的响应,研究结果可为祁连獐牙菜的后续保护提供一定的科学依据。但本研究选取的环境变量并不能完全代表影响该物种地理分布的因素。如土壤、光照、空气等环境因素以及物种相互作用和自身传播能力等都对物种的分布有重要影响<sup>[32]</sup>,尤其是土壤为植物的生长发育提供所需的水分和营养,是重要的环境因素<sup>[33]</sup>。因此,在后续研究中,应将包括土壤在内的更多环境因素纳入到模型构建中以得到更可靠的预测结果。在今后开展的保护工作中,一方面要重点保护核心区内的种群,关注与保护一般控制区内的种群,并在当地社区开展环境教育;另一方面要进一步研究该物种适应青藏高原的内在机制,为更好地保护青藏高原特有植物祁连獐牙菜提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] Naeem SR, Chazdon J, Duffy C, Prager WB. Biodiversity and human well-being: An essential link for sustainable development[J]. *Proc Royal Soc B*, 2016, 283: 2016-2091.
- [2] Xu WB, Svenning JC, Chen GK, Zhang MG, Huang JH, Chen B, Ordonez A, Ma KP. Human activities have opposing effects on distributions of narrow-ranged and wide-spread plant species in China[J]. *Proc Natl Acad Sci India Sect B Biol Sci*, 2019, 116(52): 266-274.
- [3] Liu JZ, Chen ZD, Lu AM. A preliminary analysis of the phylogeny of the Swertiinae (Gentianaceae) based on ITS data[J]. *Isr J Plant Sci*, 2001, 49(4): 301-308.
- [4] 中国科学院西北高原生物研究所青海植物志编辑委员会. 青海植物志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1997: 91-91.
- [5] 刘黄刚, 张铁军, 王莉丽, 马琳, 张丽娟. 獐牙菜属药用植物亲缘关系及其资源评价[J]. 2011, 中草药, 42(8): 1646-1650.  
Liu HG, Zhang TJ, Wang LL, Ma L, Zhang LJ. Genetic relationship and resources evaluation of medicinal plants in Swertia L. [J]. *Chinese Herbal Medicine*, 2011, 42(8): 1646-1650.
- [6] 范叔清, 周松, 卢志强, 张喜民. 藏茵陈化学成分和药理作用研究进展[J]. 现代中西医结合杂志, 2012, 21(2): 227-228.
- [7] Zhang DF, Chen SY, Zhang DJ, Gao QB. Patterns of genetic variation in *Swertia przewalskii*, an endangered endemic species of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biochem Genet*, 2007, 45(1): 33-50.

4) 如需查阅附录内容请登录《植物科学学报》网站(<http://www.plantscience.cn>) 查看本期文章附录。

- [ 8 ] IUCN Standards and Petitions Subcommittee. Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria: Version 8.1 [ R/OL ]. ( 2010-03 ). <http://intranet.iucn.org/webfiles/doc/SSC/RedList/RedListGuidelines.pdf>.
- [ 9 ] Phillips SJ , Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation [ J ]. *Ecography* , 2008 , 31 ( 2 ) : 161–175.
- [ 10 ] 崔绍朋 , 罗晓 , 李春旺 , 胡慧建 , 蒋志刚. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区 [ J ]. *生物多样性* , 2018 , 26 ( 2 ) : 171–176.
- Cui SP , Luo X , Li CW , Hu HJ , Jiang ZG. Predicting the potential distribution of white-lipped deer using the Max-Ent model [ J ]. *Biodiversity Science* , 2018 , 26 ( 2 ) : 171–176.
- [ 11 ] 段义忠 , 鱼慧 , 王海涛 , 杜忠毓. 子遗濒危植物四合木 (*Tetraena mongolica*) 的地理分布与潜在适生区预测 [ J ]. *植物科学学报* , 2019 , 37 ( 3 ) : 337–347.
- Duan YZ , Yu H , Wang HT , Du ZY. Geographical distribution and prediction of potentially suitable regions of endangered relict plant *Tetraena mongolica* [ J ]. *Plant Science Journal* , 2019 , 37 ( 3 ) : 337–347.
- [ 12 ] 宁瑶 , 雷金睿 , 宋希强 , 韩淑梅 , 钟云芳. 石灰岩特有植物海南凤仙花潜在适宜生境分布模拟 [ J ]. *植物生态学报* , 2018 , 42 ( 9 ) : 946–954.
- Ning Y , Lei JR , Song XQ , Han SM , Zhong YF. Modeling the potential suitable habitat of *Impatiens hainanensis* , a limestone-endemic plant [ J ]. *Chinese Journal of Plant Ecology* , 2018 , 42 ( 9 ) : 946–954.
- [ 13 ] 武晓宇 , 董世魁 , 刘世梁 , 刘全儒 , 韩雨晖 , 张晓蕾 , 等. 基于 MaxEnt 模型的三江源区草地濒危保护植物热点区识别 [ J ]. *生物多样性* , 2018 , 26 ( 2 ) : 138–148.
- Wu XY , Dong SK , Liu SL , Liu QR , Han YH , Zhao XL , et al. Identifying priority areas for grassland endangered plant species in the Sanjiangyuan Nature Reserve based on the MaxEnt model [ J ]. *Biodiversity Science* , 2018 , 26 ( 2 ) : 138–148.
- [ 14 ] 塞依丁·海米提 , 努尔巴依·阿布都沙力克 , 阿尔曼·解思斯 , 邵华 , 维尼拉·伊利哈尔. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响 [ J ]. *生态学报* , 2019 , 39 ( 2 ) : 629–636.
- Sayit Hamit , Nurbay Abdushalih , Arman Jiesisi , Shao H , Vinira Yilihar. Impact of human activities on potential distribution of *Solanum rostratum* Dunal in Xinjiang [ J ]. *Acta Ecologica Sinica* , 2019 , 39 ( 2 ) : 629–636.
- [ 15 ] 应凌霄 , 刘晔 , 陈绍田 , 沈泽昊. 气候变化情景下基于最大熵模型的中国西南地区清香木潜在分布格局模拟 [ J ]. *生物多样性* , 2016 , 24 ( 4 ) : 453–461.
- Ying LX , Liu Y , Chen ST , Shen ZH. Simulation of the potential range of *Pistacia weinmannifolia* in southwest China with climate change based on the maximum-entropy ( MaxEnt ) model [ J ]. *Biodiversity Science* , 2016 , 24 ( 4 ) : 453–461.
- [ 16 ] Fick SE , Hijmans RJ. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas [ J ]. *Int J Climatol* , 2017 , 37 ( 12 ) : 4302–4315.
- [ 17 ] Venter O , Sanderson EW , Magrath A , Allan JR , Beher J , Jones KR , et al. Last of the wild project , Version 3 ( LWP-3 ) : 2009 human footprint , 2018 release [ R/OL ]. Palisades , NY : NASA Socioeconomic Data and Applications Center ( SEDAC ) . <https://doi.org/10.7927/H46TOJQ4>.
- [ 18 ] Jueterbock A , Smolina I , Coyer JA , Hoarau G. The fate of the Arctic seaweed *Fucus distichus* under climate change: an ecological niche modeling approach [ J ]. *Ecol Evol* , 2016 , 6 ( 6 ) : 1712–1724.
- [ 19 ] Phillips SJ , Anderson RP , Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [ J ]. *Ecol Model* , 2006 , 190 ( 3–4 ) : 231–259.
- [ 20 ] 朱耿平 , 原雪姣 , 范靖宇 , 王梦琳. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蜡为例 [ J ]. *生物安全学报* , 2018 , 27 ( 2 ) : 118–123.
- Zhu GP , Yuan XJ , Fan JY , Wang ML. Effects of model parameters in MaxEnt modeling of ecological niche and geographic distribution: case study of the brown marmorated stink bug , *Halyomorpha haly* [ J ]. *Journal of Biosafety* , 2018 , 27 ( 2 ) : 118–123.
- [ 21 ] 吴征镒 , 孙航 , 周浙昆 , 李德铎 , 彭华. 中国种子植物区系地理 [ M ]. 北京 : 科学出版社 , 2010 : 21–22.
- [ 22 ] 李永格 , 李宗省 , 冯起 , 卫伟 , 杨静 , 吕越敏 , 等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究 [ J ]. *生态学报* , 2019 , 39 ( 7 ) : 2343–2352.
- Li YG , Li ZS , Feng Q , Wei W , Yang J , Lu YM , et al. Research on the development of the ecological protection of the Qilian Mountains based on ecological redline [ J ]. *Acta Ecologica Sinica* , 2019 , 39 ( 7 ) : 2343–2352.
- [ 23 ] George W Cox. 外来种与进化 [ M ]. 李博 , 译. 上海 : 复旦大学出版社 , 2010 : 115–115.
- [ 24 ] Bijlsma R , Loeschcke V. Genetic erosion impedes adaptive responses to stressful environments [ J ]. *Evol Appl* , 2012 , 5 ( 2 ) : 117–129.
- [ 25 ] 段元文 , 刘建全. 青藏高原特有植物祁连山獐牙菜 ( 龙胆科 ) 的花综合征与虫媒传粉 [ J ]. *植物分类学报* , 2003 , 41 ( 5 ) : 465–474.
- Duan YW , Liu JQ. Floral syndrome and insect pollination of the Qinghai-Tibet Plateau endemic *Swertia przewalskii* ( Gentianaceae ) [ J ]. *Acta Phytotaxonomica Sinica* , 2003 , 41 ( 5 ) : 465–474.
- [ 26 ] Hermansen TD , Minchinton TE , Ayre DJ. Habitat fragmentation leads to reduced pollinator visitation , fruit production

- and recruitment in urban mangrove forests[J]. *Oecologia*, 2017, 185(2): 221-231.
- [27] Honnay OK, Verheyen J, Butaye H, Jacquemyn B, Bossuyt, Hermy M. Possible effects of habitat fragmentation and climate change on the range of forest plant species[J]. *Ecol Lett*, 2002, 5(4): 525-530.
- [28] Gökbülak F. Effect of American bison (*Bison bison* L.) on the recovery and germinability of seeds of range forage species[J]. *Grass Forage Sci*, 2002, 57(4): 395-400.
- [29] 张静, 陈先江, 侯扶江. 家畜排泄物对牧草种子传播和萌发的作用[J]. *草业科学*, 2017, 34(10): 2070-2079.  
Zhang J, Chen XJ, Hou FJ. Effects of livestock excreta on herbage seed dispersal and germination[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 2070-2079.
- [30] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国自然保护区条例 [DB/OL]. (2005) [2020-04-21]. [http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-09/27/content\\_70636.htm](http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-09/27/content_70636.htm).
- [31] 祁连山国家公园管理局. 青海祁连山国家公园简介 [DB/OL]. (2018) [2020-04-21]. <http://www.forestry.gov.cn/qls/index.html>.
- [32] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 杨军, 张新时, 郭柯. 物种分布模型理论研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.  
Li GQ, Liu CC, Liu YG, Yang J, Zhang XS. Advances in theoretical issues of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- [33] 赵成章, 高福元, 石福习, 任珩, 盛亚萍. 高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应[J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6688-6695.  
Zhao CZ, Gao FY, Shi FX, Ren H, Sheng YP. *Melica przewalskyi* population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6688-6695.

(责任编辑: 张平)