

网络出版时间: 2026-05-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260521.1107.002>

小麦条锈菌青海越夏区秋季菌源调查研究

王成¹, 王奥霖¹, 马文龙¹, 姚强¹, 康振生²

(1. 青海大学农林科学院/青海省农业有害生物综合治理重点实验室, 青海西宁 810016;

2. 西北农林科技大学作物抗逆与高效生产全国重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探明小麦条锈菌青海越夏区秋季条锈病发生情况及菌源传播路径, 分别于 2023 年和 2024 年的 8—11 月对青海东部麦区主要越夏寄主小麦进行系统性田间病害调查。结果表明, 2023 与 2024 年 8—10 月青海东部麦区存在条锈菌寄主生育期重叠现象, 菌源可在不同寄主上完成侵染。小麦条锈菌在青海不受夏季高温的影响, 几乎可以在所有的小麦种植区顺利越夏, 菌源繁殖期可至 12 月; 2023 和 2024 年 8—10 月青海东部地区降水量充沛, 小麦秋苗条锈菌发病较重, 平均病叶率与降水量呈线性正相关, 且与 2023 年 9 月降水量呈显著正相关 ($P \leq 0.05$)。根据气流轨迹模拟结果推测, 青海省东部麦区秋苗条锈病发生状况可直接影响甘、宁两省小麦的秋苗发病, 甚至仅凭借一次远距离传播就可到达关中平原乃至豫南麦区, 并有机会威胁鄂西北麦区。

关键词: 小麦条锈菌; 青海越夏区; 秋季菌源调查; 前向轨迹分析

中图分类号: S512.1; S435.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)07-0981-10

Investigation and Research on the Autumn Source of Wheat Stripe Rust in the Over-Summering Areas of Qinghai

WANG Cheng¹, WANG Aolin¹, MA Wenlong¹, YAO Qiang¹, KANG Zhensheng²

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Integrated Management of Agricultural Pests/Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To investigate the occurrence of autumn wheat stripe rust and the transmission pathways of pathogen sources in the over-summering areas of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Qinghai, systematic field disease surveys were conducted on the main over-summering host wheat in eastern Qinghai from August to November in 2023 and 2024. The results showed that overlapping host growth stages occurred in the eastern wheat-growing regions of Qinghai from August to October, allowing the pathogen to complete infection across different hosts. *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Qinghai is unaffected by summer high temperatures and can successfully survive over summer in nearly all wheat-growing areas, with pathogen reproduction lasting until December. From August to October, abundant precipitation in eastern Qinghai led to severe disease occurrence in autumn-sown wheat seedlings. The average diseased leaf rate showed a linear positive correlation with precipitation, and a significant positive correlation was observed with precipitation in September of 2023 ($P \leq 0.05$). Based on airflow trajectory simulations, it is inferred that during the occurrence of stripe rust on autumn-sown wheat seedlings in the eastern wheat-growing areas of Qinghai, the disease can directly impact autumn seedling infections in Gansu and Ningxia. Moreover, through a single long-distance dispersal

收稿日期: 2025-12-15

修回日期: 2026-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32360655); 青海省重点研发计划项目 (2025-NK-129)

第一作者 E-mail: 775622353@qq.com (王成)

通讯作者 E-mail: yaoqiang2010@126.com (姚强)

event, the pathogen can reach the Guanzhong Plain and even the wheat-growing regions of southern Henan, with the potential to threaten northwestern Hubei.

Keywords: Wheat stripe rust; Over-summering areas in Qinghai; Autumn inoculum survey; Forward trajectory analysis

由条形柄锈菌小麦专化型(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*)引起的条锈病对小麦是一种毁灭性生物灾害,具有传播速度快、分布范围广、发生面积大、爆发性强、跨区域流行、可进行远距离传播等特点,病害流行年份常造成巨大的产量损失;该病害在中国曾多次爆发流行,其中发生过8次大流行,造成小麦减产累积超 1.38×10^7 t^[1-6]。青海东部麦区是中国小麦条锈病西北越夏菌源区的重要组成部分^[7],过去以种植春小麦为主,近年来随着全球气候变暖和种植结构改变,青海省冬小麦种植面积不断扩展且种植海拔不断升高,形成了春小麦和冬小麦交替种植、垂直分布的空间格局^[8]。由于青海高原地区夏季冷凉,最热旬均温低于23℃,小麦条锈菌可在全省几乎所有小麦种植区安全越夏^[2];还可在该省内海拔2 260 m以下的小麦种植区顺利越冬,因而小麦条锈菌可在青海省局部地区完成周年循环^[8]。

青海省春小麦主要分布于海拔2 000~3 200 m地区,主要栽培品种仍以阿勃、青麦1号、高原448等感病品种为主,其中种植于较高海拔地区的晚熟春麦可持续生长至10月上旬,并且在收获时田边仍遗留部分未抽穗的感病小麦。此外,近年来随着降水带的北移,每年8—10月青海东部麦区降水量充沛,适宜条锈菌的侵染和扩散^[9]。冬小麦在9月上、中旬开始播种,9月下旬陆续出苗,为条锈菌由晚熟春麦和自生麦苗向秋苗转移提供了完美的“温床”^[10]。

张吉光^[11]根据小麦种植分布和条锈菌忍耐的温度,对中国小麦条锈菌越夏区进行了重新区划,其中西北越夏区主要包括青海东部、甘肃和宁夏南部。甘肃和宁夏两省在全国小麦锈病协作组长期努力下,菌源基地综合治理水平显著提升^[12];加之气候变暖和两地种植制度的改变,甘、宁两地的越夏寄主大幅度降低,条锈菌在当地缺乏有效的寄主衔接^[13-14]。因此,小麦条锈菌青海越夏区在西北越夏区乃至整个中国小麦条锈病流行中的作用有待明确。本研究于2023年和2024年的8—11月对青海东部小麦主产区的晚熟春麦

和自生麦苗的条锈病发生情况进行系统调查,并对影响小麦条锈病发生和流行的主要气象因子进行相关性分析,基于气流轨迹模拟对青海冬麦秋苗条锈病发生期间菌源可能向外的传播和扩散路径进行推测,以期明确小麦条锈菌在青海的越夏寄主分布、范围及其在全国小麦条锈病流行中的地位。

1 材料与方法

1.1 小麦条锈病田间调查

2023年和2024年的8—10月对青海省东部小麦条锈菌关键越夏区西宁市(大通县、湟中区、城北区)、海东市(互助县、化隆县、循化县、乐都区、平安区、民和县)、海南州(贵德县、共和县)、黄南州(尖扎县、同仁县)、海北州(门源县)开展自生麦苗和冬麦秋苗条锈病调查;并于2024年8—10月对大通县、互助县和共和县等6个县(区)开展晚熟春麦条锈病调查。每个田块采取五点取样法,每个样方1 m²,记录田块的点位信息、面积、数量、海拔高度、小麦苗型、生育期,调查发病程度(病叶率、严重度)。用病叶率、严重度的加权平均数计算县(区)平均病叶率和平均严重度^[15]。

利用ArcMap 10.8软件对2023年和2024年青海省东部麦区条锈病调查区域进行掩膜提取,并对调查点位分布进行可视化。

1.2 气象数据来源

GDAS1气象数据来自美国国家环境预测中心(NCEP)全球数据同化系统(Global Data Assimilation System)(<https://www.noaa.gov/>)。

通过天气网(<https://www.tianqi24.com/>)下载青海省东部麦区2023和2024年所调查县(区)范围内8—11月平均温度和月降水量数据。

1.3 前向轨迹模拟

1.3.1 模拟运行条件

根据小麦条锈病田间调查数据,选择秋苗发病较重的3个点位,作为利用HYSPLIT模型模拟前向气流轨迹的起始点。

1.3.2 模拟运行参数设置

青海省东部麦区 9—11 月产生大量菌源。为综合反映近地面至 3 000 m 不同高度层的气流输送模式,将 10、500、1 500、3 000 m 作为小麦条锈菌夏孢子向外传播模拟的起始高度。以 72 h 作为前向轨迹模拟运行时间,每天运行四个时次,分别为每日的 00、06、12、18 h。

1.3.3 轨迹的聚类分析

利用 MeteoInfoMap 外部加载的 TrajStat(v 1.5.4)轨迹分析插件,基于欧几里得距离(Euclidean distance)聚类分析进行轨迹聚类。根据 TSV(不同类别之间的总空间方差)百分比与聚类数的变化曲线确定最优聚类数,当 TSV 百分比在曲线拐点处急剧增加时,表明经过聚类提取后的聚类簇均能够代表明显不同的传播路径,此时聚类数最优。完成聚类后,对每条聚类簇所代表的轨迹频率进行计算。

1.4 数据统计分析

利用 Origin Pro 2021 对平均病叶率与月总降水量进行皮尔逊相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦寄主的条锈病分布

晚熟春麦于 2024 年 9 月进行调查,调查范围为共和县、湟中区、化隆县、门源县、互助县和大通县共 40 块麦田,面积 5.935 hm²,海拔高度为 2 525.91~3 057.24 m,小麦生育期介于乳熟期至黄熟期之间,病田率为 100%,平均病叶率为 27.03%,平均严重度为 41.93%(表 1)。

对自生麦苗,于 2023 年 10 月中、下旬及 11 月上旬调查了包括尖扎县、化隆县和大通县等 10 个县共 226 块麦田,面积 16.749 hm²,海拔高度为 1 739.69~2 999.69 m,生育期从 1 叶 1 心到灌浆期不等,病田率 96.38%,平均病叶率 0.23%,平均严重度 18.40%(表 2)。2024 年 9 月和 11 月上旬调查了贵德县、化隆县和互助县等 8 个县共 56 块麦田,面积 12.529 hm²,海拔高度为 1 851.44~2 763.92 m,生育期从 3 叶 1 心到孕穗期不等,病田率为 74.38%,平均病叶率为 0.77%,平均严重度为 10.28%(表 3)。

表 1 2024 年晚熟春麦条锈病发生情况
Table 1 Occurrence of stripe rust in late-maturing spring wheat in 2024

县(区) Location	调查面积 Survey area/hm ²	调查田块数 Surveyed plots	病田率 Diseased field rate/%	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均严重度 Average severity/%
大通县 Datong county	0.300	3	100	30.00	60.00
共和县 Gonghe county	0.067	1	100	1.68	2.70
互助县 Huzhu county	1.267	14	100	30.53	50.50
化隆县 Hualong county	0.200	2	100	30.00	40.00
湟中区 Huangzhong district	0.434	5	100	46.15	60.00
门源县 Menyuan county	3.667	15	100	23.82	38.40

表 2 2023 年自生麦苗条锈病发生情况
Table 2 Occurrence of stripe rust in volunteer wheat seedlings in 2023

县(区) Location	调查面积 Survey area/hm ²	调查田块数 Surveyed plots	病田率 Diseased field rate/%	病叶率 Average diseased leaf rate/%	严重度 Average severity/%
大通县 Datong county	0.401	6	100	0.03	10.80
贵德县 Guide county	0.267	6	100	0.55	28.70
互助县 Huzhu county	3.432	40	100	0.08	16.50
化隆县 Hualong county	0.732	11	100	0.57	24.10
湟中区 Huangzhong district	0.333	6	100	0.03	10.00
尖扎县 Jianzha county	0.333	6	100	0.18	14.40
乐都区 Ledu district	2.933	42	78.60	0.12	18.00
民和县 Minhe county	2.552	38	81.60	0.06	19.30
平安区 Ping'an district	2.033	26	100	0.10	16.80
同仁县 Tongren county	2.800	27	100	0.22	17.70
循化县 Xunhua county	0.933	18	100	0.62	26.10

表 3 2024 年自生麦苗条锈病发生情况
Table 3 Occurrence of stripe rust in volunteer wheat seedlings in 2024

县(区) Location	调查面积 Survey area/hm ²	调查田块数 Surveyed plots	病田率 Diseased field rate/%	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均严重度 Average severity/%
城北区 Chengbei district	0.667	4	100	1.00	15.00
大通县 Datong county	0.427	9	44.40	0.12	10.00
贵德县 Guide county	4.501	17	47.10	0.41	10.30
互助县 Huzhu county	1.000	2	100	1.00	10.00
化隆县 Hualong county	4.667	12	75.00	0.86	6.40
尖扎县 Jianzha county	0.400	4	100	0.70	10.00
平安区 Ping'an district	0.133	1	100	1.00	15.00
循化县 Xunhua county	0.734	7	28.60	1.09	5.50

对冬麦秋苗,于 2023 年 10 月中、下旬对尖扎县、化隆县、循化县、民和县和乐都区共 84 块麦田进行调查,调查面积 6.244 hm²,海拔高度为 1 806.25~2 878.44 m,生育期从 1 叶 1 心到 3 分蘖不等,病田率 75.80%,平均病叶率 0.11%,平均严重度 16.20%(表 4)。2024 年 11 月上、下旬对循化县、化隆县、尖扎县、贵德县和乐都区共 41 块麦田进行调查,调查面积 11.000 hm²,海拔高度为 1 848.39~2 194.25 m,生育期从 3 叶 1 心到 5 分蘖不等,病田率为 90.00%,平均病叶率为 6.90%,平均严重度为 21.72%(表 5)。

晚熟春麦、自生麦苗和冬麦秋苗分布范围较广且自生麦苗大多与冬麦秋苗毗邻(图 1),越夏

关键时段小麦生育期重叠,且贵德县、化隆县和循化县等冬麦区自生麦苗苗龄较大(1 叶 1 心至孕穗期),自生麦苗和冬麦秋苗条锈病发生相比春麦区较重。此外,冬麦秋苗田埂上有苗龄较大发病的自生麦苗存在,利于小麦条锈菌传播的衔接。

2.2 小麦条锈菌青海越夏区秋季菌源向外输送路径分析

根据青海东部地区冬麦秋苗条锈病田间监测结果,将贵德县河西镇(36.03°N,101.40°E)、化隆县牙什尕镇(36.07°N,101.93°E)、循化县查汗都斯乡(35.85°N,102.30°E),设置为典型位点进行前向轨迹模拟(图 2~图 4)。

表 4 2023 年冬麦秋苗条锈病发生情况
Table 4 Occurrence of stripe rust in winter wheat seedlings in 2023

县(区) Location	调查面积 Survey area/hm ²	调查田块数 Surveyed plots	病田率 Diseased field rate/%	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均严重度 Average severity/%
化隆县 Hualong county	1.868	18	72.20	0.05	12.90
尖扎县 Jianzha county	0.533	5	100	0.16	16.10
乐都区 Ledu district	0.800	10	100	0.26	26.20
民和县 Minhe county	2.176	37	56.80	0.04	15.70
循化县 Xunhua county	0.867	14	50.00	0.05	10.00

表 5 2024 年冬麦秋苗条锈病发生情况
Table 5 Occurrence of wheat stripe rust on winter wheat autumn seedlings in 2024

县(区) Location	调查面积 Survey area/hm ²	调查田块数 Surveyed plots	病田率 Diseased field rate/%	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均严重度 Average severity/%
贵德县 Guide county	1.133	10	100.00	4.68	19.70
化隆县 Hualong county	5.000	12	100.00	3.80	18.30
尖扎县 Jianzha county	1.533	8	100.00	22.13	43.00
乐都区 Ledu district	0.667	3	100.00	2.00	20.00
循化县 Xunhua county	2.667	8	50.00	1.87	7.50

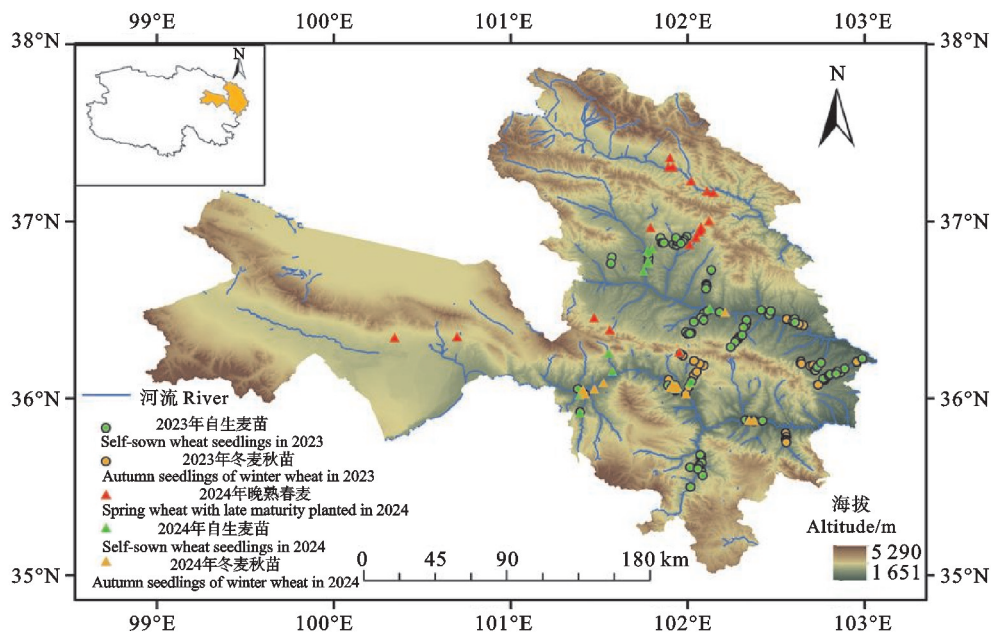
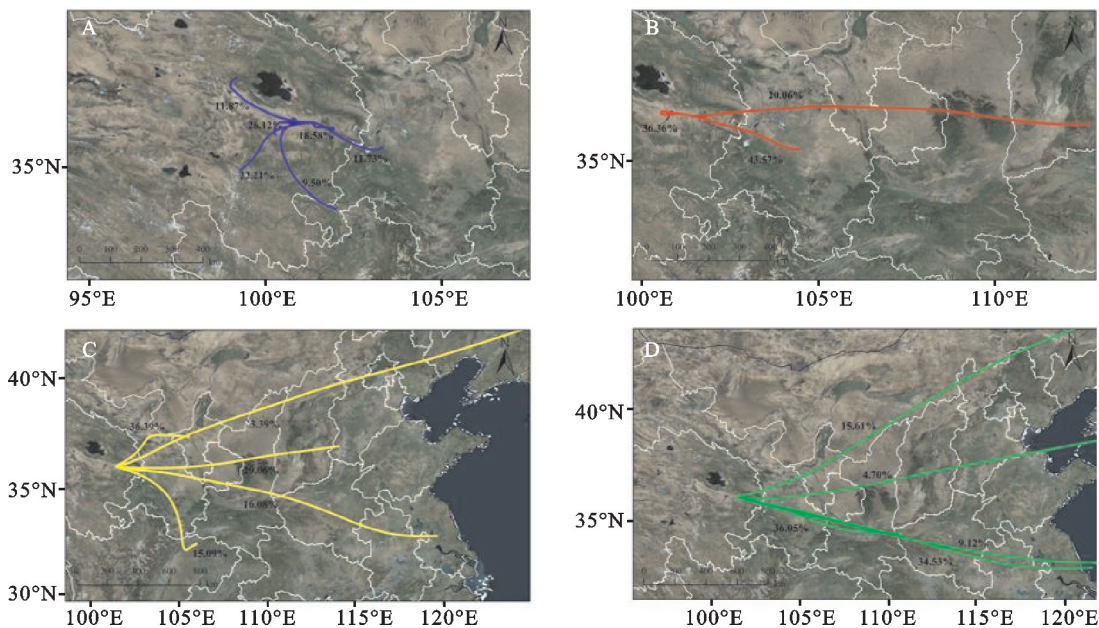


图 1 2023 和 2024 年青海省小麦条锈菌越夏调查点分布

Fig. 1 Distribution of survey sites for the over summering of wheat stripe rust in Qinghai Province across 2023 and 2024



蓝色、红色、黄色、绿色,分别代表 10、500、1 500 和 3 000 m 高度气流轨迹。下图同。

Blue, red, yellow, and green represent airflow trajectories at heights of 10 m, 500 m, 1500 m, and 3000 m, respectively. The same below.

图 2 2023 和 2024 年贵德县河西镇气流 72 h 前向轨迹聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of 72 h forward trajectories for Hexi town, Guide county in 2023 and 2024

贵德县河西镇两年度前向轨迹模拟结果(图 2)显示,10 m 高度有四类气团(共 78.78%)于省内局部扩散;东南方向有一类(11.73%)气团进入甘肃临夏地区,另一类(9.50%)气团进入甘肃玛曲地区。500 m 高度的代表性轨迹线表明,正西方

向(36.36%)气团于省内扩散;东南方向(43.57%)气团进入陇南地区;正东方向(20.06%)气团可至山西南部。1 500 m 高度的代表性轨迹线表明,东北方向(36.39%)气团经陇中地区进入宁夏中卫地区;正东方向(29.06%)气团可至河北南部地

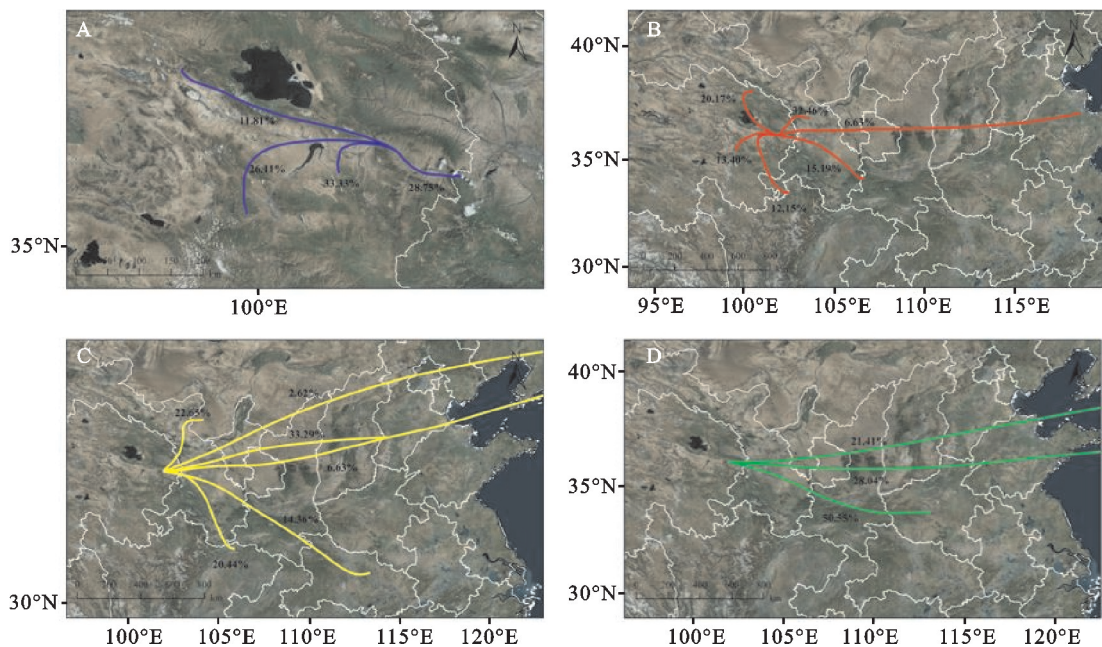


图 3 2023 和 2024 年化隆县牙什杂镇 72 h 气流前向轨迹聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of 72 h forward trajectories for Yasheng town, Hualong county in 2023 and 2024

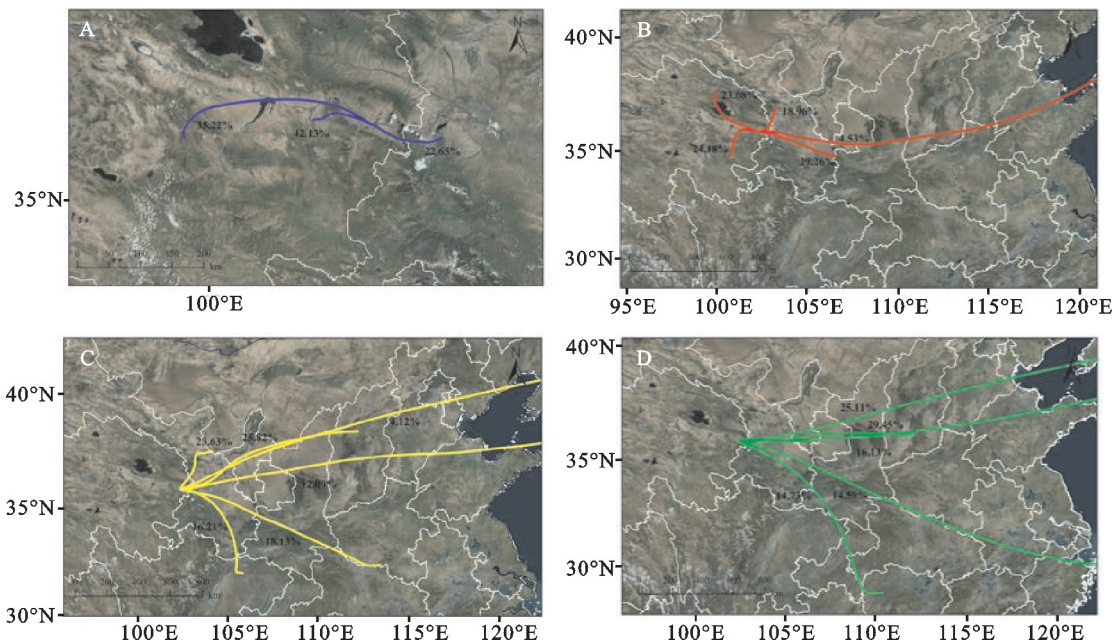


图 4 2023 和 2024 年循化县查汗都斯乡 72 h 气流前向轨迹聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of 72 h forward trajectories for Chahan Dusi township, Xunhua county in 2023 and 2024

区;西南方向有一类(16.08%)气团可至江苏中部地区,另一类(15.09%)气团经陇南地区进入四川广元地区;东北方向(3.39%)气团可至辽宁中部地区。从 3 000 m 高度的代表性轨迹线可以看出,东北方向(15.61%)气团可至河北北部;正东方向(4.70%)气团可至山东北部;东南方向有三类气团,一类(36.05%)进入河南西部,另外两类(共 43.65%)气团可至江苏中部地区。

化隆县牙什杂镇两年度前向轨迹模拟结果(图 3)显示,10 m 高度有三类气团(共 71.25%)于省内局部扩散;东南方向(28.75%)气团到达甘肃临夏积石山地区。500 m 高度有两类气团(共 33.57%)于省内局部扩散;东南方向气团(32.46%)进入陇中地区;正东方向气团(6.63%)到达山东中部偏北地区;东南方向一类气团(15.19%)进入陇南地区,另一类(12.15%)进入甘肃玛曲附近。

1 500 m 高度的代表性轨迹线表明,东北方向一类气团(22.65%)经河西走廊东端进入内蒙古,另一类气团(2.63%)可至辽宁南部地区;正东方向一类气团(33.29%)可至山西中部,另一类气团(6.63%)可至河北东南部地区;东南方向一类气团(22.44%)经陇南到达四川广元地区,另一类气团(14.36%)到达湖北中部地区。3 000 m 高度正东方向一类气团(21.41%)到达山东北部,另一类气团(28.04%)到达山东东南部地区;东南方向气团(50.55%)可至河南中部地区。

循化县查汗都斯乡两年度前向轨迹模拟结果(图 4)显示,10 m 高度有两类气团(共 77.35%)于省内局部扩散;东南方向气团(22.65%)进入甘肃临夏地区。500 m 高度有两类气团(共 47.26%)于省内局部扩散;东北方向气团(18.96%)进入陇中地区;正东方向气团(4.53%)可至山东东北部;东南方向气团(29.26%)进入陇南地区。1 500 m 高度的代表性轨迹线表明,东北方向一类气团(23.63%)进入陇中地区,一类气团(25.82%)可至山西中部,还有一类可至辽宁南部地区;正东方向气团(12.09%)可至山东北部;东南方向一类气团(18.13%)可至豫、皖交界处,另一类气团(16.21%)经陇南进入四川广元地区。3 000 m 高度东北方向气团(25.11%)可至辽宁南部;正东方向一类气团(29.45%)可至山西南部地区,另一类气团(16.13%)可至山东东部地区;东南方向一

类气团(14.59%)可至浙江东北部地区,另一类气团(14.73%)可至湖南西北部地区。

根据两年调查数据显示,贵德县河西镇、化隆县牙什尕镇和循化县查汗都斯乡处于冬、春小麦交错地区,秋季条锈病发病重,产生菌源量大。气流前向模拟轨迹发现,9—11 月气流走向总体为自西向东,10 m 高度均有气流流向甘肃临夏地区,500、1 500 和 3 000 m 气流可到达甘肃陇南地区、陇东地区和陇中地区,陕西中部和南部地区,宁夏银川以南地区,四川东北部,河南中部、南部和北部地区,山西中部和南部地区,鄂西北和江汉平原地区,山东北部和中部地区,河北中部和南部,湖南西北部、安徽南部、江苏北部地区。

2.3 青海省东部麦区气候条件对条锈病的影响

2023 年和 2024 年青海省东部麦区条锈病调查县(区)8 月温度范围处于 16.0~22 ℃,9 月温度范围处于 12.5~17.5 ℃,10 月温度范围处于 6.0~10.5 ℃,11 月温度范围处于 0.5~4.5 ℃(表 6、表 7),均低于条锈菌越夏温度上限(23 ℃),说明温度对青海省东部麦区条锈菌越夏无明显影响。相关性分析结果显示,2023 年和 2024 年 8、9、10 月的降水量与小麦平均病叶率呈线性正相关关系,且 2023 年 9 月降水量与小麦平均病叶率显著正相关($P<0.05$),线性方程为 $y=0.0014x+0.02(P\leqslant 0.05,r=0.63)$ 。

表 6 2023 年小麦条锈病越夏区月平均气温和降水量

Table 6 Monthly mean temperature and precipitation in the over-summering regions of wheat stripe rust in 2023

县(区) Location	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均温度 Mean temperature/℃				降水量 Precipitation/mm			
		8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.
大通县 Datong county	0.03	16.5	12.5	6.5	1.0	124.9	123.1	88.1	0
贵德县 Guide county	0.55	19.5	16.0	9.0	4.5	285.6	251.7	65.4	2.0
互助县 Huzhu county	0.08	17.0	13.0	6.5	1.5	159.2	127.0	71.3	0
化隆县 Hualong county	0.17	16.0	12.5	6.0	0.5	79.0	124.3	35.5	0
湟中区 Huangzhong district	0.03	16.5	13.0	7.0	2.5	279.0	87.6	36.1	0
尖扎县 Jianzha county	0.15	18.5	15.5	8.5	4.0	52.3	105.8	149.4	0
乐都区 Ledu district	0.15	18.0	14.0	8.0	2.0	16.1	9.4	16.2	0
民和县 Minhe county	0.05	22.0	17.5	10.5	4.0	36.5	76.6	37.7	4.9
平安区 Ping'an district	0.11	19.0	17.5	8.0	2.5	32.3	26.9	2.2	0

表 7 2024 年小麦条锈病越夏区月平均气温和降水量

Table 7 Monthly mean temperature and precipitation in the over-summering regions of wheat stripe rust in 2024

县(区) Location	平均病叶率 Average diseased leaf rate/%	平均温度 Mean temperature/℃				降水量 Precipitation/mm			
		8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.
城北区 Chengbei district	1.00	17.5	14.0	7.0	1.0	266.7	508.3	60.6	1.3
大通县 Datong county	0.12	17.5	14.5	7.0	0.5	105.0	78.1	29.8	4.2
贵德县 Guide county	1.13	20.5	17.5	10.0	3.5	281.9	245.4	11.6	12.5
互助县 Huzhu county	1.00	17.5	14.0	7.5	0.5	52.0	44.6	2.2	0
化隆县 Hualong county	2.35	16.5	13.5	6.5	0.5	392.4	17.7	2.1	2.3
尖扎县 Jianzha county	20.95	20.5	16.5	9.5	3.5	298.2	197.3	28.2	4.4
乐都区 Ledu district	2.00	18.0	14.0	8.0	1.0	34.0	169.1	6.3	2.1
平安区 Ping'an district	1.00	18.0	14.5	8.0	0.5	67.3	79.8	19.0	0
循化县 Xunhua county	1.60	21.0	16.5	10.0	4.5	1 156.2	403.9	80.0	2.2

3 讨论

青海是中国小麦条锈病西北越夏区的组成部分,20 世纪,青海小麦种植以春麦为主,冬小麦面积积极小,虽然自生麦苗有一定数量的越夏菌源,但因冬麦区间距离较远,越夏菌源传播作用在西北越夏区中的作用最小^[16]。随着全球气候的变暖,青海省东部农区冬小麦种植面积逐年增加,种植海拔区域已上升到 2 500 m 左右,面积稳定在 1.33×10⁴ hm²,条锈病的发生和流行也发生显著变化^[16]。本研究发现,青海高海拔地区大量的越夏菌源可在晚熟春麦持续侵染至 10 月上旬,区域内的冬小麦 9 月中下旬播种,10 月初完成出苗,晚熟春麦和自生麦苗上大量菌源可有效地将菌源传播到冬麦秋苗;9 月份青海晚熟春麦和自生麦苗存在寄主重叠现象,使得菌源在晚熟春麦、自生麦苗和冬麦秋苗寄主上形成衔接。在晚熟春麦发病期延长和冬麦面积扩大后自生麦苗增多的共同作用下,青海地区条锈菌越夏范围进一步扩大、越夏时间延长,越夏菌源量增大,对邻近省份乃至东部小麦主产区的秋苗侵染造成潜在影响,这一结果与姚强^[17]的研究结论一致。

Hu^[9]等研究发现,降水利于小麦条锈菌的萌发、侵入和繁殖,利于夏孢子在寄主间的传播扩散,同时为田间营造冷凉、湿润的环境条件,适宜小麦条锈菌侵染。本研究也发现,2023 年和 2024

年青海东部麦区在降水量较多的年份,条锈菌越夏发生程度也相对较重,越夏期条锈病病叶率与月降水量呈线性正相关,且病叶率与 9 月的降水量显著正相关($P\leq 0.05$)。青海省东部麦区 9 月温度为 12.5~17.5℃,伴随降水的影响,致使 9 月成为产生秋季菌源的关键月份。Zhang 等^[18]研究结果表明,青海临近省份受高温影响,仅甘肃南部和宁夏南部(六盘山区)可以完成越夏,小麦条锈菌越夏范围较少,而青海东部麦区夏季气候冷凉、频繁降水和寄主小麦生育期重叠,成为西北最为独特的越夏区。据本课题组多年多次多点调查,青海提供有效秋季菌源的时间范围为 9 月至 12 月中旬,至病叶干枯,条锈菌进入休眠和越冬期为止,持续提供菌源时间可达 100 d,策源全国小麦条锈病秋季流行。

近年来,青海东部地区种植结构改变,贵德县、化隆县和循化县现以冬小麦种植为主,秋季条锈病发生较重,菌源量大,发病时期较长^[10]。张太学^[19]对青海省共和地区 2011—2019 年 10 月 1 日—11 月 30 日进行前向气流轨迹分析发现,共和地区秋季气流走向主要以向东为主,传播范围基本在青海本地和临近的甘南地区,到达其他地区的频率均较低,这与本研究中贵德县、化隆县和循化县典型位点 10 m 气流前向轨迹模拟结果相似。Wang 等^[20]通过后向轨迹模拟研究发现,豫南地区冬前条锈病的发生病原菌部分来源于西北

越夏区,根据气流不同高度模拟发现贵德县河西镇秋季有气流到达豫南地区,这可能是引起豫南地区条锈病最早发生的原因。王海光^[21]利用HYSPLIT-4 轨迹模式对小麦条锈菌远程传播规律进行模拟发现,秋季西北越夏区菌源主要影响西北地区、四川、华北地区。青海东部麦区是西北小麦条锈菌的关键越夏菌源基地,明确其秋季菌源动态与传播路径,是预测下游冬麦区秋苗发病程度、实现病害早期精准预警的前提。本研究通过对2023年和2024年贵德县河西镇、化隆县牙什尕镇和循化县查汗都斯乡三个县(区)9—11月不同高度72 h前向气流轨迹模拟,发现气流走向整体呈现自西向东方向,10 m高度气流主要在省内进行局部扩散,频率为71.25~78.78%;其余气流主要进入甘肃临夏地区,频率为11.73~28.75%。500 m高度气流在省内进行扩散频率为36.36~47.26%,其余52.74~63.64%气流进入甘肃陇南、陇中和陇东地区及东部地区,最远可至山东东北部。通过对1 500和3 000 m气流轨迹模拟,气流向东进行扩散经甘肃陇南地区、陇东地区和陇中地区,可达四川东北部、宁夏银川以南地区、关中平原、山西中部、北部和南部地区,湖北西北部 and 东部地区及黄淮海平原等其他地区。黄苗苗等^[22]研究表明,青海晚熟春麦的菌源可直接传播到早播秋苗,不必通过自生麦苗的传播,并通过分子标记的方法发现甘肃、青海省小麦条锈菌秋季流动主要是从青海到甘肃,青海的群体与甘肃临夏、平凉(崆峒)群体之间的遗传距离比陇南文县的近,这与本研究气流前向轨迹模拟结果相似。Li等^[23]通过毒力特征、种群遗传分析、气流轨迹模拟和田间病害监测,发现青海东部小麦条锈菌会扩散到六盘山的西部和东部,进而到达关中平原,这些研究结果一定程度上说明了青海东部麦区越夏寄主重叠形成菌源衔接,以及气流前向轨迹模拟结果的可靠。

综上所述,青海现已成为西北越夏区中越夏菌源量较大、持续期最长的越夏“菌源库”,并且对中国中、东部广大小麦主产区冬麦秋苗构成潜在威胁。因此,加强青海越夏菌源区的源头治理对中国小麦主产区条锈病的综合治理具有重要意义。进一步研究还需定量核算青海省秋季菌源量对下游冬麦秋苗病害发生流行的风险及具体风险等级,以便各农业部门针对性地制定病害综合治理策略。本研究结果较为全面和精确地掌握了青

海省小麦条锈菌的越夏发生和分布,对青海条锈病菌源区及其在我国流行区系中的作用有了新的认识和见解,可为青海越夏菌源区的进一步治理提供参考。

参考文献:

- [1]李宇翔,胡小平. 中国小麦条锈病传播路径研究进展[J]. 植物病理学报,2025,55(4):911.
LI Y X, HU X P. Research progress on the migration pathways of wheat stripe rust in China [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2025, 55(4): 911.
- [2]陈万权,康振生,马占鸿,等. 中国小麦条锈病综合治理理论与实践[J]. 中国农业科学,2013,46(20):4254.
CHEN W Q, KANG Z S, MA Z H, et al. Integrated management of wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(20): 4254.
- [3]马占鸿. 中国小麦条锈病研究与防控[J]. 植物保护学报, 2018, 45(1): 1.
MA Z H. Researches and control of wheat stripe rust in China [J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45(1): 1.
- [4]王奥霖,刘岩,李晓文,等. 基于后向轨迹分析的辽东半岛南端冬小麦条锈病菌源初探[J]. 植物保护,2025,51(4):119.
WANG A L, LIU Y, LI X W, et al. Identification of the source of wheat stripe rust in the southern tip of Liaodong Peninsula based on backward trajectory analysis [J]. *Plant Protection*, 2025, 51(4): 119.
- [5]刘万才,王保通,赵中华,等. 我国小麦条锈病历次大流行的历史回顾与对策建议[J]. 中国植保导刊,2022,42(6):21.
LIU W C, WANG B T, ZHAO Z H, et al. Historical review and countermeasures of wheat stripe rust epidemics in China [J]. *China Plant Protection*, 2022, 42(6): 21.
- [6]WANG N, TANG C L, FAN X, et al. Inactivation of a wheat protein kinase gene confers broad-spectrum resistance to rust fungi [J]. *Cell*, 2022, 185(16): 2961.
- [7]WANG J, LIU X Y, MA M J, et al. Virulence and diversity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* populations in northwestern and southwestern overwintering regions of China [J]. *Plant Disease*, 2025, 109(4): 890.
- [8]姚强,郭青云,闫佳会,等. 青海东部麦区小麦条锈菌越冬调查初报[J]. 植物保护学报,2014,41(5):578.
YAO Q, GUO Q Y, YAN J H, et al. Survey on overwintering *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* at different altitudes in eastern Qinghai [J]. *Journal of Plant Protection*, 2014, 41(5): 578.
- [9]HU X M, LI Y X, CHEN F H, et al. Dynamic of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* urediniospore and its correlation with wheat stripe rust epidemics in Xiangyang of China [J]. *Crop Protection*, 2024, 185: 106898.
- [10]王璇,卢恩钰,周小妹,等. 2023年青海越夏菌源区冬小麦秋苗条锈病发生动态[J]. 植物保护,2025,51(4):330.
WANG X, LU E Y, ZHOU X M, et al. Dynamics of wheat

- stripe rust on autumn-seeded winter wheat seedlings in the summer-spore reservoir region of Qinghai in 2023 [J]. *Plant Protection*, 2025, 51(4): 330.
- [11] 张吉光. 中国小麦条锈菌主要越冬区菌源与下游条锈病流行关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- ZHANG J G. Relationship between inoculum sources in major overwintering areas and epidemic of wheat stripe rust in downstream regions of China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2025.
- [12] 陈万权. 中国小麦条锈病生态调控技术研究与应用[J]. 植物医学, 2025(2): 1.
- CHEN W Q. Research and application of ecological management for control of wheat stripe rust in China [J]. *Plant Health and Medicine*, 2025(2): 1.
- [13] HU X P, CAO S Q, CORNELIUS A, *et al.* Predicting overwintering of wheat stripe rust in central and northwestern China [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(1): 44.
- [14] 李喜红, 刘媛, 马景, 等. 2022/2023 年度宁夏小麦条锈病防控实践与思考[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(11): 97.
- LI X H, LIU Y, MA J, *et al.* Practice and reflection on the control of wheat stripe rust in Ningxia during 2022/2023 season [J]. *China Plant Protection*, 2024, 44(11): 97.
- [15] 孙振宇, 黄瑾, 张勃, 等. 甘肃省冬麦区 2021 年春季小麦条锈病发生情况调查[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(7): 60.
- SUN Z Y, HUANG J, ZHANG B, *et al.* Investigation of the long-distance transports of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China using HYSPLIT-4 model [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2022, 53(7): 60.
- [16] 陈万权, 刘太国. 我国小麦秋苗条锈病发生规律及其区菌源传播关系[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 50.
- CHEN W Q, LIU T G. Occurrence of wheat stripe rust in autumn-sown seedlings and inter-regional inoculum dispersal of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China [J]. *Plant Protection*, 2023, 49(5): 50.
- [17] 姚强. 青海省小麦条锈病流行规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- YAO Q. Studies on the epidemic regularity of wheat stripe rust in Qinghai Province [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [18] ZHANG J G, LI Y X, LIU D, *et al.* Re-delimiting overwintering regions of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China [J]. *Phytopathology Research*, 2025, 7(1): 13.
- [19] 张太学. 中国小麦条锈菌气流传播模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- ZHANG T X. Simulation study on airborne dispersal of wheat stripe rust pathogen in China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [20] WANG A L, CAO S Q, PENG H, *et al.* Identification of wheat stripe rust inoculum sources and dispersal routes responsible for initial rust establishment in southern Henan of China [J]. *Plant Disease*, 2025, 109(2): 361.
- [21] 王海光, 杨小冰, 马占鸿. 基于 HYSPLIT-4 模式的小麦条锈病菌远程传播研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(5): 55.
- WANG H G, YANG X B, MA Z H. Investigation of the long-distance transports of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China using HYSPLIT-4 model [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(5): 55.
- [22] 黄苗苗, 陈万权, 曹世勤, 等. 甘肃、青海地区小麦条锈菌监测及群体遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(18): 3693.
- HUANG M M, CHEN W Q, CAO S Q, *et al.* Surveillance and genetic diversity analysis of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Gansu and Qinghai Provinces [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(18): 3693.
- [23] LI Y X, ZHANG S Y, LIU D, *et al.* Migration of wheat stripe rust from the primary overwintering region to neighboring regions in China [J]. *Communications Biology*, 2025, 8: 350.