Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2026, 16(11), 1614-1620
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2026.1611142

Hans汉斯

机场雷暴潜势预报方法研究

胡建军[1]，朱雯娜[2]，韩　磊[3]，刘　欢[4]

[1]民航新疆空管局，新疆　乌鲁木齐
[2]民航新疆空管局气象中心，新疆　乌鲁木齐
[3]民航新疆空管局气象部，新疆　乌鲁木齐
[4]民航新疆空管局阿克苏空管站，新疆　阿克苏

收稿日期：2026年8月21日；录用日期：2026年11月2日；发布日期：2026年11月18日

摘　要

雷暴是严重威胁民航飞行安全与航班正常运行的灾害性天气，新疆区域地形复杂、雷暴突发性与局地性强，常规预报方法难以满足空管保障需求。文章依托民航新疆空管局气象中心已有的TSP雷暴潜势预报方法，结合WRF、WRF-RUC中尺度模式资料，通过多案例统计与修正，将此方法逐步推广至新疆辖区所有运输机场。研究成果贴合民航气象一线业务实际，可为新疆空管局气象中心及辖区机场提供简便易用的雷暴潜势预报工具，提升强对流天气预警与航空运行保障能力。

关键词

TSP方法，数值模式，雷暴潜势预报

A Thunderstorm Potential Forecasting Method for Airports

Jianjun Hu[1], Wenna Zhu[2], Lei Han[3], Huan Liu[4]

[1]Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang
[2]Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang
[3]Meteorological Department of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang
[4]Aksu Air Traffic Control Station, Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Aksu Xinjiang

Received: August 21, 2026; accepted: November 2, 2026; published: November 18, 2026

Abstract

Thunderstorms are hazardous weather phenomena that critically threaten the safety and regularity of civil aviation operations. In Xinjiang, the intricate topography combined with the sudden

文章引用: 胡建军, 朱雯娜, 韩磊, 刘欢. 机场雷暴潜势预报方法研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(11): 1614-1620.
DOI: 10.12677/ag.2026.1611142

onset and strong local intensity of thunderstorms poses substantial challenges to conventional forecasting methods in meeting the operational demands of air traffic control (ATC). Building upon the existing Thunderstorm Probability (TSP) forecasting approach used by the Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, this study incorporates data from WRF and WRF-RUC mesoscale models. Through statistical analysis and correction of multiple cases, the TSP method is progressively applied to all Xinjiang transport airports. The results are closely aligned with the practical requirements of frontline civil aviation meteorological services, providing an easily applicable thunderstorm potential forecasting tool for the Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau and its subordinate airports. This tool is expected to markedly strengthen the capability for severe convective weather warning and aviation operational support.

Keywords

TSP Method, Numerical Models, Thunderstorm Potential Forecasting

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

雷暴及其伴随的大风、风切变、冰雹、短时强降水等天气，直接威胁航空器起降安全，极易造成航班延误、备降、返航，是民航气象预报与空管运行保障的重点和难点。新疆地域辽阔，地形以盆地、山地为主，受西风带系统、中亚天气系统及地形影响，雷暴天气具有尺度小、生命史短、局地性强、预报难度大等特点，对预报准确率和提前量要求更高。

近年来，数值预报技术在强对流预报中广泛应用，WRF 中尺度模式物理过程完善、分辨率较高，是强对流潜势预报的重要支撑。雷暴潜势预报现有方法多基于探空对流参数，采用权重–概率统计[1]、多元回归[2]、Logistic 回归[3] [4]、事件概率回归[5]、逐步回归[6]及熵值法多参数加权[7]等建立预报方程，并在广东[3] [8]、四川[9]、北京[10]、浙江[7]及机场终端区[4] [11]开展了分区、分季节建模实践。机器学习方法如随机森林、支持向量机提升了非线性识别能力[11] [12]；焦作将双判据 K 指数与卫星、雷达、闪电定位相结合，建立了临近监测预警系统[13]；集合预报联合概率及再分析/集合产品评估为阈值选取和不确定性表达提供了依据[10] [14]；“配料法”则强调不稳定、水汽和抬升三要素的综合诊断[15]。然而，上述方法多偏重热力稳定度参数，对动力抬升和雷达信息利用不足，本文从动力、热力及水汽等多方面综合评估雷暴潜势，已基于 WRF 模式建立 TSP (雷暴潜势)预报方法，在乌鲁木齐机场业务应用中效果良好，但仅局限于单机场，未覆盖辖区其他机场。

为满足新疆空管气象业务保障需求，完善区域化雷暴潜势预报手段，本文以 TSP 指数计算为核心，利用 WRF、WRF-RUC 中尺度模式资料，开展适用性研究，形成可直接用于日常预报业务的雷暴潜势预报方法与指标体系。

2. 资料与数据处理

2.1. 资料来源

本文研究过程中使用的资料类型齐全、来源稳定，均为民航新疆空管局气象中心业务运行中实时获取、常态化应用的标准产品，能够保证研究结果的真实性、可靠性与业务一致性。主要资料包括以下三

类：一是中尺度数值模式资料，采用本地部署业务运行的 WRF、WRF-RUC 模式输出的物理量诊断产品，重点提取 10 分钟最大风速、组合反射率、回波顶高、对流有效位能、对流抑制能量、抬升指数等与雷暴发生发展密切相关的物理量；二是实际观测资料，收集整理民航气象信息共享与服务系统的新疆辖区内各机场近 3 年完整的例行观测报告、单站雷达(乌鲁木齐机场雷达)和疆内雷达拼图等实况信息，用于典型个例筛选、TSP 指数检验、阈值验证及方法适用性评估。

2.2. 数据处理

直接取用业务系统输出的标准化数值模式物理量产品，根据 TSP 指数计算需求，对关键物理量进行人工或半自动化提取、整理、归纳与对比分析，结合新疆各机场历史雷暴个例进行统计分析，形成规范、统一、可重复使用的标准化物理量序列。

3. TSP 指数计算方法

由于雷暴天气现象具有高破坏性、突发性强的特点，因此在气象预报中对雷暴发生潜势做出准确、及时的估计对社会生产及人民生命财产安全有直接而重大的意义。故本文将系统、严谨地介绍 TSP 指数的计算方法：先讨论所选关键物理量的选取及分级赋值，再给出指数计算公式，然后说明雷暴潜势等级的判据，最后阐述针对乌鲁木齐机场区域所做的本地化订正方法。

3.1. 关键物理量与分级赋值

TSP 指数是以对雷暴发生有十分明确物理意义的六个物理量来构造的，即 10 分钟最大风速(WSPD)、组合反射率(CR)、回波顶高(TOP)、对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)及抬升指数(LI)，而各物理量又从不同方面反映大气的动力、热力及水汽条件，把这六项作为评估雷暴潜势的根据。

结合乌鲁木齐机场历史雷暴个例各物理量值，把有关雷暴发生可能性的各物理量划分为四个等级，相应地赋予 1~4 的分数，等级越高，说明该物理量所指示的雷暴潜势越强。具体而言，采用四分位数法和均值法确定各物理量的阈值，对雷暴个例中各物理量的数值分布进行统计，取第 25 百分位数(P25)、第 50 百分位数(中位数)、第 75 百分位数(P75)作为划分等级的边界。P25 以下为低值区(等级 1)，P25~P50 为较低值区(等级 2)，P50~P75 为较高值区(等级 3)，P75 以上为高值区(等级 4)。具体阈值及赋值标准见表 1。

Table 1. Thresholds and assigned values of TSP-related physical quantities
表 1. TSP 相关物理量阈值及赋值

物理量	低(1)	中(2)	高(3)	极高(4)
WSPD (m/s)	<5	[5, 8)	[8, 10)	≥10
CR (dBZ)	<30	[30, 35)	[35, 40)	≥40
TOP (km)	<6	(6, 8)	[8, 10)	≥10
CAPE (J/kg)	<100	[100, 200)	(200, 300)	≥300
CIN (J/kg)	>200	(150, 200]	(100, 150]	≤100
LI (℃)	>0	(−1.0, 0)	[−1.0, −2.0)	≤−2.0

3.2. TSP 指数计算公式

TSP 指数的计算公式是在大量历史雷暴个例统计与物理机理分析基础上确定的，设计过程中充分考虑了不同物理量在雷暴发生、发展过程中的作用差异与敏感程度。公式重点突出 10 分钟最大风速所代表

的动力强迫条件，以及对流抑制能量所代表的对流触发条件，这两项因子对雷暴是否能够发生具有直接控制作用，因此在指数合成中给予独立加权。同时，为全面反映对流发展强度，公式选取组合反射率、回波顶高、对流有效位能、抬升指数四项中贡献最显著的一项作为代表，体现雷暴发展的最强潜势信号。

由于把敏感因子与最强潜势因子结合起来并作了恰当的平均处理，因此所得到的一体化指数能很好地反映动力、能量、稳定度及风暴强度诸因素，而此种计算方法又符合大气科学基本原理，也与新疆地区雷暴发生的气候规律高度契合，故有极好的物理意义及业务实用性。具体公式如下。

$$TSP = \frac{i_{WSPD} + i_{CIN} + \max\left(i_{CR}, i_{TOP}, i_{CAPE}, i_{LI}\right)}{3} \tag{1}$$

由于(1)式中所用的 i 是各物理量按相应阈值区间确定的等级赋值，而 max 是组合反射率、回波顶高、对流有效位能、抬升指数诸项物理量赋值中的最大值，因此该合成方法既保留了主要敏感因子，又自然、合理地提取了对流环境中最强的信号，故所得指数对雷暴潜势的识别有极好的效果。

3.3. 雷暴潜势等级判据

为使 TSP 指数能够直接应用于民航气象日常预报业务，避免主观判断差异，本研究基于新疆辖区多年雷暴天气样本的统计检验与业务试用结果，将计算得到的 TSP 指数划分为三级雷暴潜势判据，形成可直接用于预警提示、业务通报和运行决策的客观标准。

由于 TSP ≥ 3 时大气中动力、能量、稳定度以及风暴发展的诸种要素都十分有利于雷暴发生，因此此时雷暴发生可能性极大，预报员应当及时发布雷暴潜势预警，并主动地向空中交通管制、机场运行、航空公司诸部门作出重点提示，提前做好防范准备。与此形成极好对照的是，2 ≤ TSP < 3 时大气已有利于对流发展的基本条件，雷暴发生可能性处于中等偏高水平，局地触发雷暴的可能性不能排除，故此时宜加强天气系统演变的跟踪，加密观测频次，加大分析力度，适时、准确地发布有关提醒信息。而 TSP < 2 时大气整体层结稳定，能量、动力条件都不支持雷暴发生，故雷暴出现概率极低，可按日常常规预报保障流程正常处理。更难得的是，所选等级判据简明直观，极易掌握，也最有利于保证雷暴潜势判断的客观性及各预报员之间的一致性。

3.4. 乌鲁木齐机场本地化订正

乌鲁木齐机场地处天山北麓，地形与环流特征独特，在春季和初夏常受到东南大风天气影响。在东南大风控制下，近地面风速持续偏大，同时大气层结稳定，对流抑制能量偏小，若直接采用标准 TSP 公式计算，会因风速项分值过高而导致指数异常偏高，出现“有风无雷暴”的空报情况，对预报结论和运行决策造成干扰。

由于要解决本地天气特点所造成的预报偏差问题，故本文结合长期业务经验及大量历史个例的复盘分析，系统、严谨地建立了乌鲁木齐机场东南大风 TSP 指数订正方案：即对当前要计算的预报时次，先向前检索 5 个时次、再向后检索 5 个时次，共 11 个连续时次的风向资料，若所有时次都判定为东南风，则合理地认为此时受东南大风过程影响，因此不具备雷暴触发条件。于是，在 TSP 指数计算时，把该时次的 10 分钟最大风速(WSPD)强制赋值为 1 级(最低等级)，由此自然、妥帖地抵消东南大风造成的指数虚高，也因而有效地滤除误报信号。本地化订正之后，TSP 指数在东南大风天气下的空报率大大降低，指数结果更贴合乌鲁木齐机场的实际天气规律。

4. TSP 方法业务化释用

本研究以 WRF、WRF-RUC 中尺度数值模式资料为核心支撑，依托模式较高的时空分辨率与完善的

物理过程描述，系统性选取新疆辖区内各机场近三年来记录完整、代表性强的典型雷暴天气个例，在乌鲁木齐机场成熟应用的基础上，通过多案例统计与修正，将 TSP 方法逐步推广至新疆辖区所有运输机场，形成机场本地化适配、全流程可业务化运行的雷暴潜势预报方法。表 2 是近两周新疆机场 TSP 指数预报与机场实况对比，图 1 是乌鲁木齐机场多普勒雷达强度图，图 2、图 3 是新疆多普勒雷达强度拼图，新疆机场雷暴出现时段与 TSP 指数大值区匹配较好，对制作和发布机场强对流预报预警有很好的指导作用。

Table 2. Thunderstorm cases
表 2. 雷暴个例

机场	日期	时次(UTC)	TSP	天气现象
乌鲁木齐机场	2026 年 9 月 1 日	15:00	2	少量对流云
		16:00	1	-
		17:00	1	小阵雨
		18:00	1	弱雷雨伴少量对流云
		19:00	1	少量对流云
伊宁机场	2026 年 8 月 31 日	16:00	1.33	少量对流云
		17:00	1	少量对流云
		18:00	1	-
		19:00	1	-
		20:00	1.33	-
		21:00	1.67	-
		22:00	2	少量对流云
		23:00	2	中雷雨伴疏量对流云
	2026 年 9 月 1 日	00:00	1.33	少量对流云
		01:00	1	-
克拉玛依机场	2026 年 8 月 26 日	06:00	2.67	少量浓积云
		07:00	3	少量浓积云
		08:00	2.33	少量积雨云
		09:00	3	弱雷雨伴疏量对流云
		10:00	3	少量对流云
		11:00	2.67	弱雷雨伴疏量对流云
		12:00	2.67	-(无人工观测)
		13:00	1.67	-(无人工观测)
		14:00	1.33	-(无人工观测)
库车机场	2026 年 9 月 6 日	10:00	2.67	少量浓积云
		11:00	2.33	少量浓积云
		12:00	2.33	少量对流云
		13:00	2.33	干雷暴伴疏量对流云
		14:00	1.33	小阵雨伴少量对流云
		15:00	1.33	-
		16:00	1.67	-

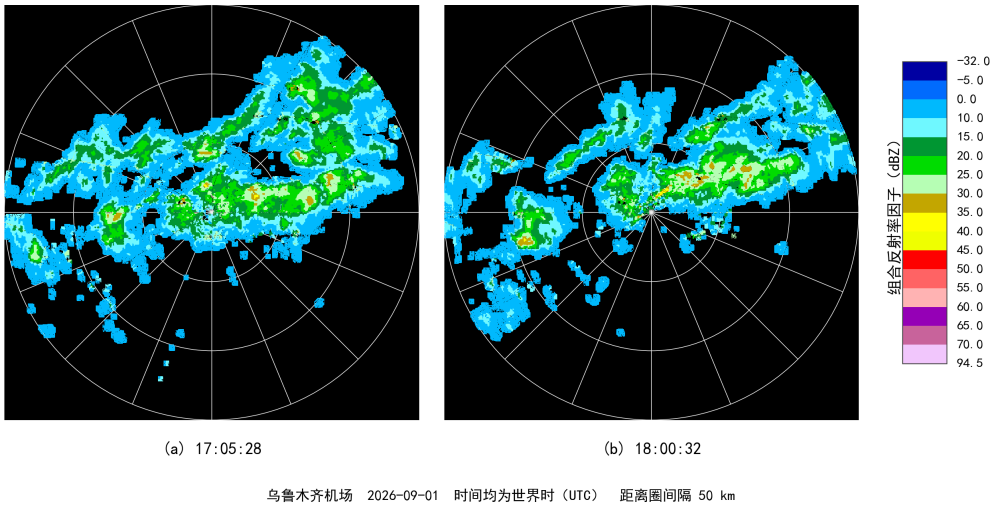


Figure 1. Doppler radar reflectivity images of Urumqi Airport at 17:00 and 18:00 on September 1, 2026
图 1. 乌鲁木齐机场多普勒雷达强度图 2026 年 9 月 1 日 17 时和 18 时

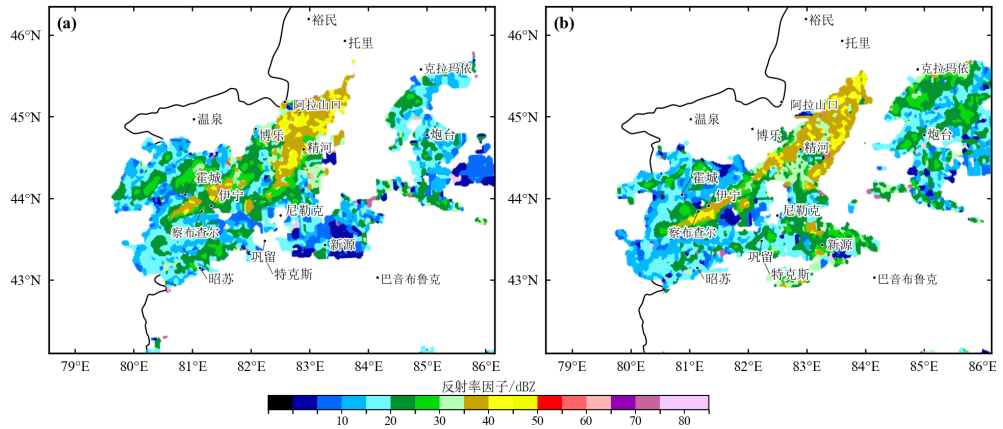


Figure 2. Xinjiang Doppler radar reflectivity mosaic (around Yining) at 22:00 and 23:00 on August 31, 2026
图 2. 新疆多普勒雷达强度拼图(伊宁周边)2026 年 8 月 31 日 22 时和 23 时

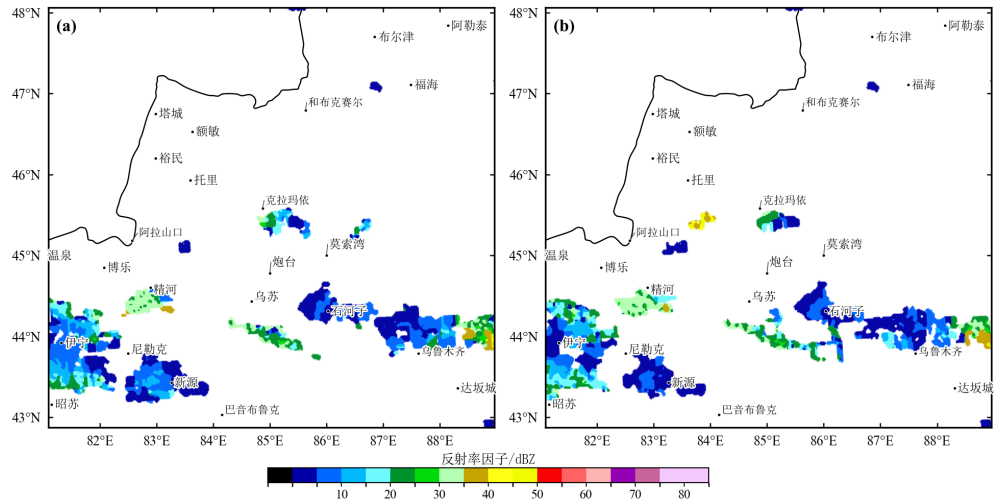


Figure 3. Xinjiang Doppler radar reflectivity mosaic (around Karamay) at 09:00 and 11:00 on August 26, 2026
图 3. 新疆多普勒雷达强度拼图(克拉玛依周边)2026 年 8 月 26 日 09 时和 11 时

5. 业务应用与保障意义

由于本文从民航新疆空管局气象实际需求出发，就 TSP 指数基本计算方法做了系统、严谨的分析，因此能自然、合理地建立标准化的雷暴潜势预报流程，也符合一线预报工作的习惯。

由于 TSP 方法能合理、充分地利用 WRF、WRF-RUC 模式资料并进行当地订正，故能自然、可靠地识别新疆区域雷暴高潜势时段及区域，提前给出客观预报指标，有利于提高雷暴、雷暴大风、强降水等强对流天气的预警能力，减少漏报、空报。在雷雨季节，该方法对空管流量管理、航班调整、机场运行决策都有极好的支撑作用，也因而直接降低强对流天气带来的飞行安全风险，减少航班延误、备降、返航事件，切实提高新疆空管气象保障能力及服务水平。更难得的是，所获结果可系统、规范地总结为业务方法，对今后民航气象技术交流、经验推广都有极实在的帮助，真正提升新疆区域民航强对流天气预报业务能力。

6. 结论

本文以 TSP 雷暴潜势预报方法为核心，结合 WRF、WRF-RUC 模式资料，完成了新疆区域雷暴潜势预报本地化研究与业务化应用分析，形成了可直接用于民航新疆空管局气象日常业务的预报方法与指标体系。TSP 指数物理意义明确、计算方法简便，能够很好地适应新疆区域雷暴潜势客观化预报需 求，可直接融入现有业务流程；乌鲁木齐机场东南风订正方法简单有效，明显降低了特定天气背景下的空报率，更加贴近实际保障场景。整套方法无需复杂操作，实用性强，适合预报员直接使用并在辖区机场推广应用，对提升新疆民航雷暴天气保障能力具有切实的业务价值。

基金项目

民航新疆空管局科技项目“基于 TSP 方法的雷暴天气潜势预报研究”资助。

参考文献

[1] 吕晓娜, 牛淑贞, 张一平, 等. 基于概率与权重的雷暴大风潜势客观预报方法研究[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(1): 20-29.

[2] 徐丽娜. 武川县某风电场雷暴潜势预报方法分析[J]. 内蒙古气象, 2016(5): 16-18.

[3] 庞古乾, 伍志方, 叶爱芬, 等. 珠三角地区前汛期强对流潜势预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 564-568.

[4] 李婧, 高洁. 基于对流参数的西安机场雷暴潜势预报方法[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 441-449.

[5] 张雯. 多探空因子在绵阳雷暴潜势预报中的应用[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(4): 8-10.

[6] 李文娟, 鄢敏杰. 基于探空资料的雷暴潜势预报方法[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(3): 27-30.

[7] 胡晓, 蒋飞燕, 徐璐, 等. 基于不稳定参数统计的雷暴潜势预报方法研究[J]. 浙江气象, 2016, 37(2): 1-7.

[8] 庞古乾, 伍志方, 郭春迁, 等. 广东省前汛期分区强对流潜势预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 265-272.

[9] 龙柯吉, 康岚, 黄晓龙, 等. 四川复杂地形下雷暴大风客观预报方法研究[J]. 气象, 2025, 51(1): 57-67.

[10] 付宗钰, 于波, 荆浩, 等. 联合概率方法在北京灾害天气预报中的应用研究[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 1-9.

[11] 杨洁, 曹正, 杜宇, 等. 基于随机森林算法的广州白云机场终端区雷暴潜势预报[J]. 热带气象学报, 2022, 38(3): 387-396.

[12] 周明薇, 肖稳安, 张其林, 等. 基于支持向量机的雷暴潜势预报初探[J]. 大气科学学报, 2016, 39(4): 1-8.

[13] 刘跃红, 闫小利, 宋自福, 等. 焦作市雷暴潜势预报及临近监测预警系统[J]. 气象, 2007(8): 104-111.

[14] 王婧卓, 陈静, 马若赞, 等. 基于再分析数据和集合预报产品的对流潜势评估[J]. 应用气象学报, 2025, 36(2): 218-232.

[15] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象, 2014, 40(4): 389-399.