

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.021

论文标题： 基于环境质量的祁连山青海云杉林森林康养功能评价

作　　者： 王 斌，王顺利，袁 浩，等

收稿日期： 2025-05-26

引文格式： 王斌,王顺利,袁浩,等.基于环境质量的祁连山青海云杉林森林康养功能评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):214-222.

WANG B, WANG S L, YUAN H, et al. Evaluation of the forest wellness function of *Picea crassifolia* forest in Qilian mountains based on environmental quality[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):214-222.

相关论文推荐

Recommended articles

基于语义情感的森林康养满意度分析——以西樵山森林公园为例

Semantic sentiment-based analysis of forest therapy satisfaction: a case study of Xiqiao mountain forest park

森林康养旅游政策的量化评价与“十五五”发展展望

Quantitative evaluation of forest health and wellness tourism policies and development prospects for the 15th Five-Year Plan

森林康养旅游意愿及其影响因素研究——以广州市为例

Study on forest therapy tourism intention and its influencing factors: a case study of Guangzhou

森林康养产业发展的动力机理研究

Research on the dynamic mechanism of the development of forest health care industry

我国森林康养产业的供需前景分析

Analyses on the development prospect of forest health industry in China

市场导向下森林康养产业发展的动力机制

The power mechanism of industry development under the market orientation

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.021 http: //qks.csuft.edu.cn

基于环境质量的祁连山青海云杉林森林康养功能评价

王 斌[1, 2]，王顺利[1]，袁 浩[1, 2]，赵维俊[1, 2]，马雪娥[1, 2]，武秀荣[1, 2]，武龙庆[1]，敬文茂[1, 2]

（1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000；
2. 甘肃祁连山森林生态系统定位观测研究站，甘肃 张掖 734000）

摘 要：【目的】系统分析森林康养环境因子的时空变化特征及其对人体舒适度的影响，评价其康养功能，为祁连山国家公园入口社区森林康养产业发展提供理论依据，拓宽祁连山生态产品价值实现路径。【方法】以祁连山青海云杉 *Picea crassifolia* 林为研究对象，通过小气候监测（温度、湿度、风速）、空气质量指标（$PM_{2.5}$、PM_{10}、空气负离子浓度）的定量测定，结合气候舒适度模型（综合舒适度指数，*S*）与 Pearson 相关性分析，揭示青海云杉林康养功能的季节性分异规律。【结果】1）小气候因子呈现显著的日动态与月际差异，其中 7—8 月温度 18 ～ 24 ℃、湿度 45% ～ 65%、风速低于 1 m/s 的组合最符合人体舒适需求。2）$PM_{2.5}$ 浓度为 2.08 ～ 12.43 μg/m^3，PM_{10} 浓度为 25.35 ～ 54.56 μg/m^3，均低于国家一级标准限值，空气质量优良。3）空气负离子浓度（1 340 ～ 2 610 个 /m^3）在夏季达到峰值，且与温度（r=0.524，P ＜ 0.05）、风速（r=0.390，P ＜ 0.01）呈显著正相关，与 $PM_{2.5}$（r=−0.361，P ＜ 0.01）及湿度（r=−0.370，P ＜ 0.01）呈负相关。【结论】综合环境小气候、舒适度和空气质量的评价表明，祁连山青海云杉林具有康养功效且效果显著，且 7 月上旬至 8 月中旬为最优康养期（S ≤ 4.55，Ⅰ级），该时段兼具最优气候舒适度（Ⅰ级）与空气质量（空气负离子浓度Ⅰ级 +$PM_{2.5}$ 一级），能够提供优质的森林康养环境。

关键词：青海云杉林；康养功能；舒适度指数；空气负离子浓度；相关性分析

中图分类号：S788.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)05-0214-09

Evaluation of the forest wellness function of *Picea crassifolia* forest in Qilian mountains based on environmental quality

WANG Bin[1,2], WANG Shunli[1], YUAN Hao[1,2], ZHAO Weijun[1,2], MA Xue'e[1,2], WU Xiurong[1,2], WU Longqing[1], JING Wenmao[1,2]

(1. Gansu Province Academy of Water Resource Conservation Forests of the Qilian Mountains, Zhangye 734000, Gansu, China;
2. Gansu Qilian Mountains Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Zhangye 734000, Gansu, China)

Abstract:【Objective】To analyze the spatio-temporal variation characteristics of forest health and wellness environmental factors and their impact on human comfort, evaluate their health and wellness functions, and to provide a theoretical basis for the development of the forest health and wellness industry in the entrance communities of the Qilian mountain national park, broadening the path for realizing the value of Qilian mountain's ecological products.【Method】Taking the *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains as the research object, through quantitative determination of microclimate monitoring (temperature, humidity, wind speed) and air quality indicators ($PM_{2.5}$, PM_{10}, air negative ion concentration), combined with the climate comfort model (comprehensive comfort index, *S*) and Pearson correlation analysis, the seasonal differentiation law of the health care function of the *Picea crassifolia* forest is revealed.【Result】1) The microclimate factors showed significant daily dynamics and monthly differences, among which the combination of temperature (18-24 ℃), humidity (45%-65%), and wind speed (＜ 1 m/s) from July to August was most in line with human comfort needs; 2) The concentrations of $PM_{2.5}$ (2.08-12.43 μg/m^3) and PM_{10} (25.35-54.56 μg/m^3) were both lower than the national first-class standard limits, indicating good air quality; 3) Concentration of air negative ion (1 340-2 610 ions/m^3) peaked in summer, and was significantly positively correlated with temperature (r=0.524, P ＜ 0.05) and wind speed (r=0.390, P ＜ 0.01), and negatively correlated

收稿日期（Received）：2025-05-26 **修订日期**（Revised）：2025-08-08

基金项目：甘肃省林业和草原科技计划项目（2023kj11）；甘肃省重点人才项目（2026RCXM018）；甘肃省自然科学基金项目（23YFFG0002，23JRRG0022，24JRRG034）；张掖市科技计划项目（ZY2024KY01）。

第一作者：王斌（qlsshywb@163.com），工程师。 **通信作者：**王顺利（61749724@qq.com），研究员，硕士。

引文格式：王斌 , 王顺利 , 袁浩 , 等 . 基于环境质量的祁连山青海云杉林森林康养功能评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5): 214-222.

WANG B, WANG S L, YUAN H, et al. Evaluation of the forest wellness function of *Picea crassifolia* forest in Qilian mountains based on environmental quality[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):214-222.

with $PM_{2.5}$ (r=−0.361, $P < 0.01$) and humidity (r=−0.370, $P < 0.01$). 【Conclusion】The comprehensive evaluation of microclimate, comprehensive comfort, and air quality showed that the Picea crassifolia forest in the Qilian mountains has a significant wellness effect, and the period from early July to mid-August is the optimal wellness period (S ≤ 4.55, Grade I), which combines the best climate comfort (Grade I) and air quality (NAI Grade I + $PM_{2.5}$ Grade I), providing a high-quality forest wellness environment.
Keywords: *Picea crassifolia* forest; wellness function; comfort index; air negative oxygen ions; correlation analysis

森林康养是依托森林中的生态环境，以促进人民健康为目的，融合森林资源、景观资源和文化资源并与医学、养生学有机融合，开展保健养生、康复疗养、健康养老的服务活动 [1-2]。随着经济社会的快速发展，城市化进程加快，城市高楼林立、交通拥堵，快节奏生活和高强度工作让人们长期处于精神紧绷状态，身心压力持续加重 [3-8]。在此背景下，人们对健康生活的渴望愈发强烈，开始积极探寻能够缓解压力、促进身心健康的方式 [9-10]。森林，作为大自然赋予人类的宝贵资源，以其独特的生态环境逐渐受到人们的关注。依托森林环境开展各类活动，充分利用森林丰富的自然资源，以促进人体身心健康。森林中富含空气负离子，每立方厘米空气中的负离子含量可达数千甚至上万个，远高于城市环境，这些负离子可有效改善人体的心肺功能，增强机体免疫力 [11]。同时，森林中的植物会释放出萜烯类、醇类等多种挥发性物质，这些植物精气具有杀菌、抗炎、镇静安神等功效，对人体的神经系统和免疫系统有着积极的调节作用 [12]。此外，森林还拥有宜人的小气候，温度、湿度适宜，风速适中，能够为人们提供舒适的环境，缓解精神压力，促进身心放松 [13-14]。

当前，森林康养已成为全球研究热点。学者们围绕森林环境因子对人体生理与心理的影响机制展开深入研究，综合考量森林生态环境质量、景观美学价值、康养设施完备程度等多方面因素，张涵菀漪等 [15] 基于 AHP 对广州市越秀公园的康养功能进行评价分析，苏玉姣等 [16] 和罗莹等 [17] 对不同森林区域的康养潜力予以量化评估。但在研究方法上多以定性分析和短期监测为主，长期、动态的定量研究较少 [18-20]，难以准确把握森林康养环境因子的变化规律及其对人体健康的长期影响。研究区域分布不均衡，多集中在福建等南方森林资源丰富的地区 [21-23]，目前对北方森林，尤其是像祁连山青海云杉 *Picea crassifolia* 林这类具有独特生态环境的森林，相关研究仍较为薄弱；此外，目前研究多为单一康养因子的变化特征及其影响分析，缺乏对多种康养环境因子综合作用的深入分析，难以全面、系统评估森林的康养功能。

祁连山是我国重要的生态屏障，森林资源丰富多样，对维护区域生态平衡起着至关重要的作用。青海云杉林作为祁连山地区典型的森林植被类型，分布广泛且生态系统较为稳定，不仅在保持水土、涵养水源、调节气候等方面发挥关键生态功能，还蕴含巨大森林康养产业发展潜力。然而，针对祁连山青海云杉林的森林康养研究相对匮乏，人们对其康养环境因子的变化特征以及康养功能的认识还不够全面和深入 [24]。本研究以祁连山青海云杉林为研究对象，深入探讨其森林康养环境因子的季节变化规律与内在关联，并对其康养功能进行综合评价，可为公众选择适宜的森林康养时段和方式提供科学参考，为国家公园体系森林康养资源的合理开发提供理论依据，对优化祁连山国家公园生态服务功能、实现森林生态系统的可持续发展具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究试验区设于祁连山北麓中段大野口流域的青海云杉林内，该区域隶属于祁连山国家公园（100°17′08″E，38°33′12″N）管控范围，流域面积约 80 km^2，年均降水量为 400 mm，年均蒸发量为 1 488 mm，年平均温度为 −0.6 ～ 2.0 ℃，年日照时数 1 892.6 h，日总辐射量 110.28 kW/m^2，年平均相对湿度 60%，气候属于半湿润森林草原气候。海拔落差大，形成明显海拔梯度变化的植被类型及其对应的土壤类型。本研究区域的植被带是寒温性针叶林带，青海云杉林是该流域乔木树种的主要建群种，多为郁闭度在 0.6 左右的中林龄或近熟林，土壤类型主要是森林灰褐土。林分群落结构主要由灌木层、苔藓枯落物层和草本层构成，灌木主要包括鲜黄小檗 *Berberis diaphana*、金露梅 *Potentilla fruticosa*、银露梅 *Potentilla glabra* 等，草本主要有藓生马先蒿 *Pedicularis muscicola*、披针薹草 *Carex lancifolia*、珠芽蓼 *Polygonum viviparum* 等。

1.2　数据来源

本研究数据源自甘肃祁连山森林生态系统定位观测研究站承建的青海云杉林综合观测场，该

观测场可实现实时监测并通过物联网终端进行数据传输。研究采用 2022 年小气候综合观测塔离地 2 m 处的空气温度、相对湿度、风速实测气象数据，采集频度为 10 min/ 次。空气负离子浓度数据使用综合观测场 FLZ1-213 型固定式负离子（Negative air ion，NAI）浓度自动监测仪获取。$PM_{2.5}$、PM_{10} 数据通过 EDTDRX-CN 颗粒物监测仪获取，采集频度为 10 min/ 次，且仪器监测高度均为 1.5 m。

1.3　研究时间及观测指标

1.3.1　研究时间

鉴于研究区位于青藏高原东北缘，属于大陆性气候，春冬季寒冷漫长，昼夜温差大，11 月至次年 4 月，大部分地区气温均在 0 ℃以下，不适宜开展户外活动。青海云杉林生长季集中在 5—10 月，草本植物展叶期多在 4 月中下旬。因此，本研究选择 5—9 月作为户外康养活动的研究期，此时段气候适宜，植被处于生长季，游客更倾向于此时进入山林开展户外活动，选取 8:00—18:00 时间段开展研究。

1.3.2　数据分析

对采集的空气负离子和气象监测数据进行整编。筛选出 2022 年 5—9 月空气温度、湿度、风速、空气负离子、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 的监测数据，检验所有要素的极值、平均值，确保数据完整，对雷雨、大风天气数据进行剔除，截取 8:00—18:00 的观测数据，经分组聚合将 10 min 数据平均为逐小时数据，按照小时的时间排序对监测数据进行排列。运用 Excel 2010 软件对数据进行整理和绘图，借助 SPSS 27.0 统计分析软件进行数据分析。

1.3.3　气候舒适度评价方法

气候对人体的影响通常用人体舒适度衡量，使用综合舒适度指数来定量描述人体对气候变化的感受程度（表 1）。综合舒适度指数计算公式 [25] 如下：

$$S=0.6\times|T-21|+0.07\times|H_R-70|+0.5\times|V-2|。$$

式中：S 为综合舒适度指数；T 为温度（℃）；V 为每一时刻风速测试的平均值（m/s）；H_R 为空气相对湿度（%）。综合舒适度指数越小，表示人体的舒适程度越高；反之，则越低。

表 1　气候舒适度评价等级

Table 1　Summary of climate comfort evaluation levels

评价等级 Evaluation level	综合舒适度指数 Comprehensive comfort index	舒适程度 Comfort level
Ⅰ	$S \leqslant 4.55$	非常舒适
Ⅱ	$4.55 < S \leqslant 6.95$	舒适
Ⅲ	$6.95 < S \leqslant 9.00$	不舒适
Ⅳ	$S > 9.00$	极度不舒适

2　结果与分析

2.1　青海云杉林不同季节森林小气候变化特征

由图 1 可知，祁连山青海云杉林不同月份温度日变化均呈现出先快速升高后缓慢降低的趋势，峰值集中在 13:00—15:00，不同季节的温度均值差异显著。森林康养提出的人体最适温度为 18 ～ 24 ℃。经统计，5 月有 7 d 共 47 h 平均温度高于 18 ℃，且这些时段多集中在 5 月下旬；6 月有 17 d 共 96 h 平均温度为 18 ～ 24 ℃；7 月有 22 d 共 154 h 平均温度为 18 ～ 24 ℃；8 月有 13 d 共 89 h 平均温度为 18 ～ 24 ℃；9 月有 6 d 共 22 h 平均温度为 18 ～ 24 ℃。

由图 2 可知，5、6、8 月祁连山青海云杉林相对湿度日变化表现为缓慢下降后保持稳定，而 7、9 月相对湿度日变化呈先降低后缓慢升高的变

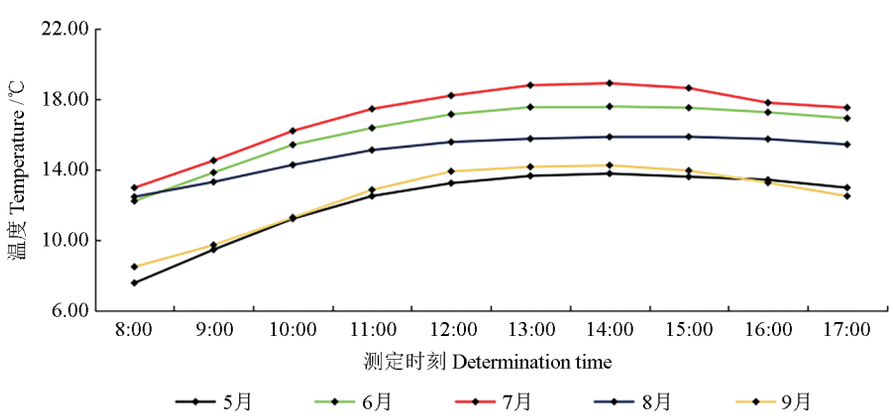


图 1　5—9 月青海云杉林温度日变化曲线

Fig. 1　Daily temperature variation curve of Qinghai spruce forest from May to September

化趋势。在森林康养的标准中，人体最舒适的相对湿度为 45% ～ 65%。5 月相对湿度最小，平均湿度为 40.54%；8 月相对湿度最大，平均湿度为 76.18%；除 5 月和 8 月外，6、7、9 月相对湿度均处在人体最舒适的湿度范围内，适宜开展户外活动。5—9 月相对湿度为 45% ～ 65% 的时长分别为 63、52、72、78、103 h。

由图 3 可知，5—9 月祁连山青海云杉林风速日变化呈单峰型。原因可能是太阳辐射增强，地面温度上升，林冠层次受热不均，蒸腾作用吸热，气流交换加强，风速变大；日落后，地面温度逐渐降低，空气交流减弱，风速变小。5—9 月，风速均小于 1 m/s，风力等级低于 3 级，适宜开展户外休闲活动。

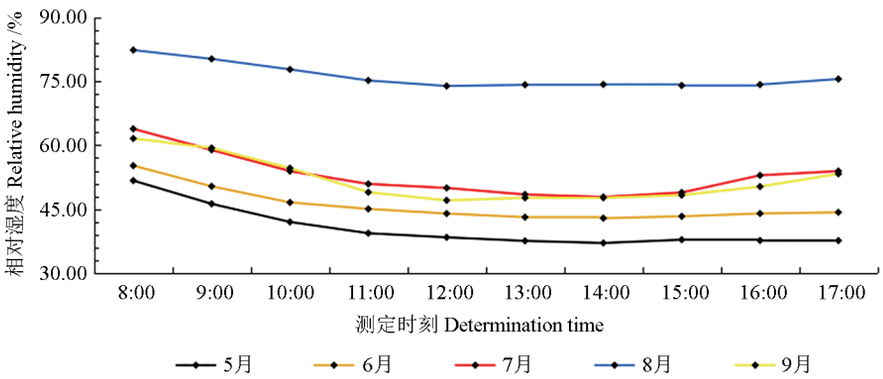


图 2　5—9 月青海云杉林相对湿度日变化曲线

Fig. 2　Daily variation curve of relative humidity in Qinghai spruce forest from May to September

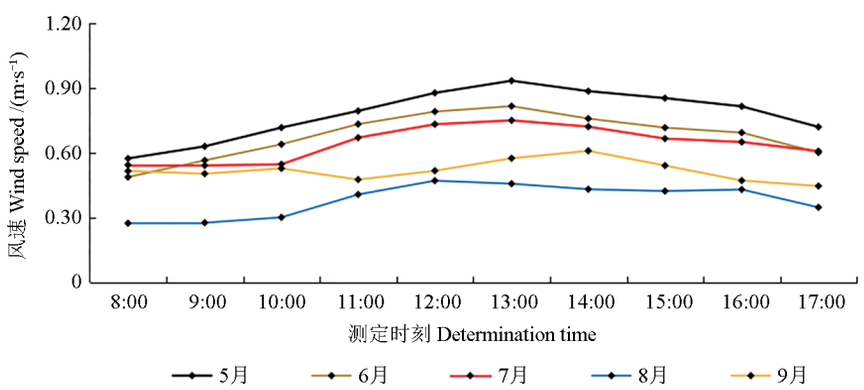


图 3　5—9 月青海云杉林风速日变化曲线

Fig. 3　Daily variation curve of wind speed in Qinghai spruce forest from May to September

2.2　青海云杉林的森林康养气候舒适度

2.2.1　气候舒适度日变化

由图 4 可知，5—9 月祁连山青海云杉林气候舒适度日变化呈双峰型分布，不同月份综合舒适度指数上午和下午时段偏大，中午时段指数偏小。5 月综合舒适度指数在全时段内均超过 6.95，气候舒适度处于不舒适的状态，不适宜进行户外康养活动；6 月综合舒适度指数除 8:00 外全时段内均低于 6.95，气候舒适度处于舒适的状态，且随着温度的升高，中午时段出现低谷，气候舒适度处于非常舒适状态；7、8 月综合舒适度指数在全时段内均低于 6.95，且 7、8 月在中午开始气候舒适度处于非常舒适状态，8 月傍晚因祁连山区昼夜温差大，温度回落，综合舒适度指数开始增大；9 月，上午、下午时段综合舒适度指数均超过 6.95，气候舒适度处于不舒适状态，不宜进行户外康养活动，其他时段气候舒适度均处于舒适状态。

2.2.2　气候舒适度月变化

由表 2 可知，7、8 月祁连山青海云杉林的综合舒适度指数在 4.55 以下，达到了气候舒适度等级 Ⅰ 级。7、8 月只有早上时段由于林内光照强度较弱，温度相对凉爽，人体感受舒适，其余时间均处于非常舒适状态。6、9 月的综合舒适度指数在 6.95 以下，达到了气候舒适度等级 Ⅱ 级，6 月除清晨 8:00 综合舒适度指数略高于 6.95 外，大多时段处于舒适状态，13:00—15:00 综合舒适度指数等于或低于 4.55，达到非常舒适状态；9 月，中午以后综合舒适度指数为 4.55 ～ 6.95，12:00—14:00 达到舒适状态。

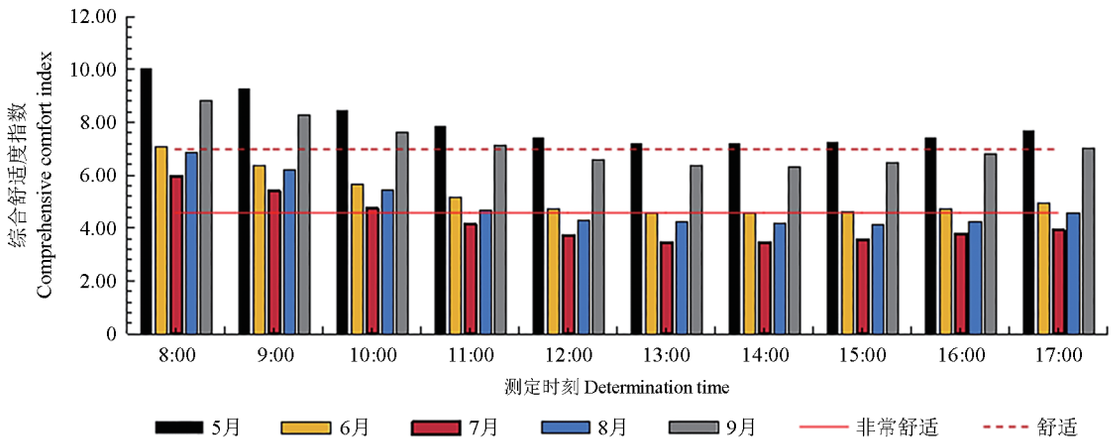


图 4 5—9 月青海云杉林综合舒适度指数日变化

Fig. 4 Comprehensive comfort index changes in Qinghai spruce forest from May to September

表 2 5—9 月青海云杉林气候舒适度等级

Table 2 Climate comfort level of Qinghai spruce forest from May to September

月份 Month	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September
综合舒适度指数 Comprehensive comfort index	7.50	4.81	3.78	4.39	6.73
气候舒适度等级 Climate comfort level	III	II	I	I	II

2.3 青海云杉林空气颗粒物浓度变化特征

5—9 月祁连山青海云杉林空气颗粒物浓度变化如图 5 所示。由图 5 可知，5—9 月青海云杉林的 $PM_{2.5}$ 月平均浓度变化规律不明显，整体处于较低区间波动，5 月日平均浓度为 4.49 ～ 10.23 μg/m^3，6 月为 6.69 ～ 12.43 μg/m^3，7 月为 6.86 ～ 11.60 μg/m^3，8 月为 2.47 ～ 6.82 μg/m^3，9 月为 2.08 ～ 4.10 μg/m^3，各月份日平均浓度均在《环境空气质量标准》所规定一级浓度限值（35 μg/m^3）的范围内，且远低于该限值，整体浓度水平较低，非常适宜进行森林康养活动。

5—9 月青海云杉林的 PM_{10} 浓度日平均值变化规律与 $PM_{2.5}$ 浓度不同，5 月 PM_{10} 浓度日平均变化总体为上升趋势，呈双峰型分布，日均浓度低于一级浓度限值（50 μg/m^3）的天数共计 7 d；6 月日平均变化总体呈下降趋势，日均浓度低于一级浓度限值（50 μg/m^3）的天数共 27 d；7 月日平均变化趋于平稳，整体在 30 ～ 50 μg/m^3 区间内波动，日均浓度低于一级浓度限值（50 μg/m^3）的天数共计 29 d；8 月日平均变化为先上升后下降，低于一级浓度限值（50 μg/m^3）的天数共计 28 d；9 月 PM_{10} 浓度日平均变化为先上升后下降再上升，低于一级浓度限值（50 μg/m^3）的天数共计 29 d。祁连山青海云杉林 PM_{10} 浓度月均值从大到小排序依次为 5 月（54.56 μg/m^3）＞ 6 月（32.49 μg/m^3）＞ 9 月（26.87 μg/m^3） ＞ 8 月（25.45 μg/m^3） ＞ 7 月（25.35 μg/m^3），5 月 PM_{10} 浓度偏高，超过一级浓度限值，这可能是因为春季多大风天气，地表干燥，土壤湿度低，沙尘容易被大风扬起进入大气中，加之天气系统不稳定，降水偏少，不利于颗粒物的沉降和净化，使得 PM_{10} 在大气中积聚。同时，祁连山周边地区进行农田翻耕、播种等农事作业，这些活动会导致地表尘土飞扬，进一步推高 PM_{10} 浓度。

2.4 青海云杉林不同季节空气负离子浓度变化特征

5—9 月祁连山青海云杉林空气负离子浓度变化如图 6 所示。由图 6 可知，5 月空气负离子浓度为 240 ～ 1 550 个 /m^3，6 月为 1 340 ～ 2 610 个 /m^3，7 月为 2 230 ～ 2 500 个 /m^3，8 月为 1 560 ～ 2 270 个 /m^3，9 月为 2 130 ～ 2 260 个 /m^3。5 月、6 月、8 月空气负离子浓度的变化特征呈双峰型波动，5 月在 8:00 空气负离子浓度达到峰值，随后小幅度下降后又上升；6 月、8 月空气负离子浓度小幅度上升至第一个峰值后下降，在 11:00—13:00 达到谷值后开始上升，13:00—14:00 出现第二个峰值后又下降；7 月、9 月空气负离子浓度的日变化规律不显著，在区间范围内呈现平稳动态变化。5 月除 16:00—17:00 达到空气负离子浓度Ⅰ级外，其余时间段空气负离子浓度均处在Ⅱ、Ⅲ级 [26]；6 月除 16:00—17:00 空气负离子浓度等级为Ⅱ级外，其他时间段空气负离子浓度均达到Ⅰ级；7 月、8 月、9 月空气负离子浓度均达到Ⅰ级，空气清新，适合开展户外休闲活动。

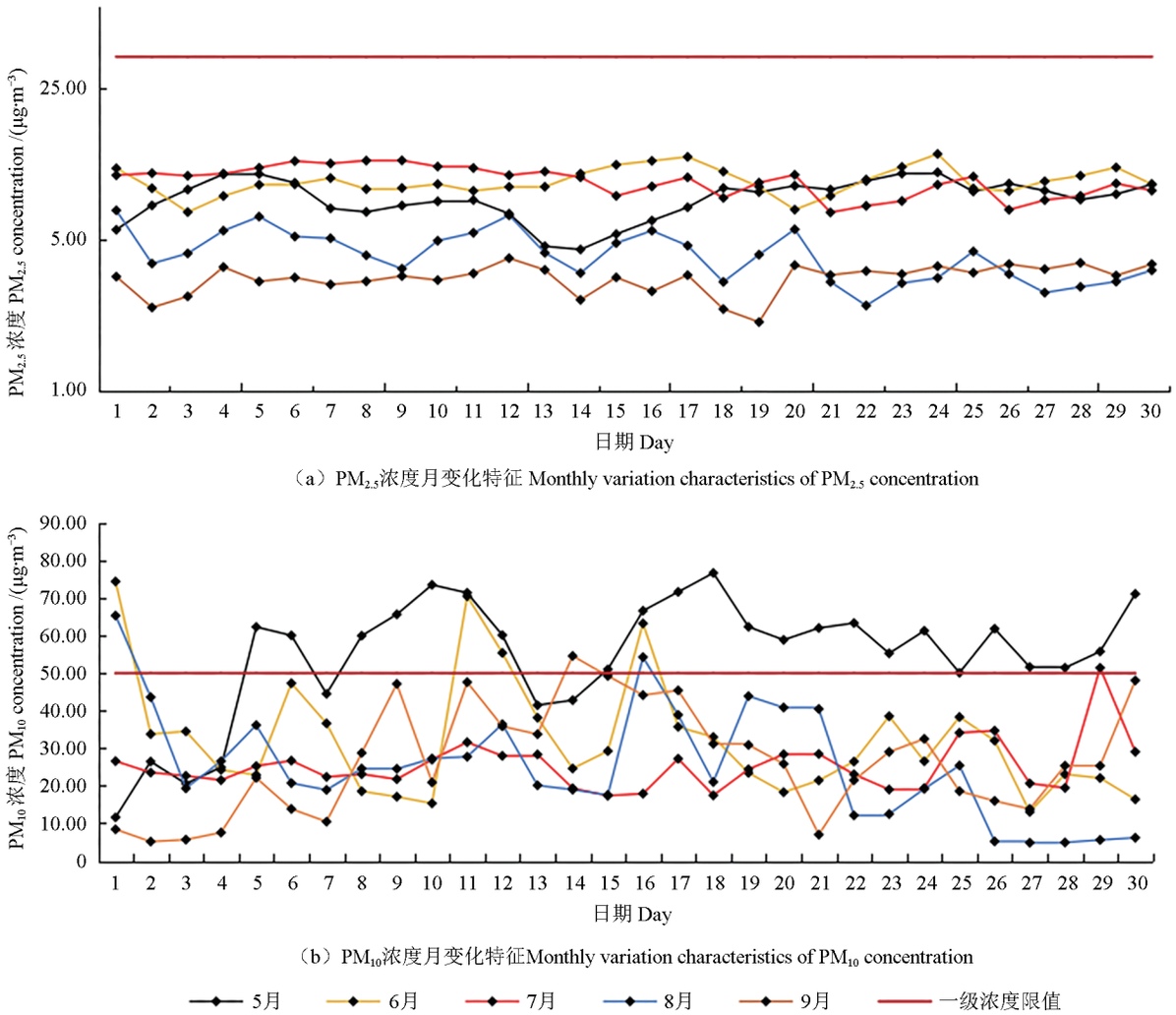


图 5　5—9 月青海云杉林空气颗粒物浓度月变化

Fig. 5　Monthly variation of air particulate matter concentration in Qinghai spruce forest from May to September

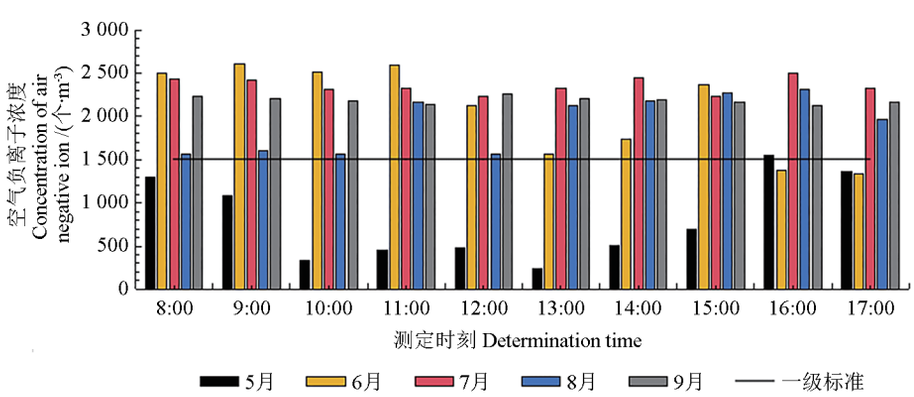
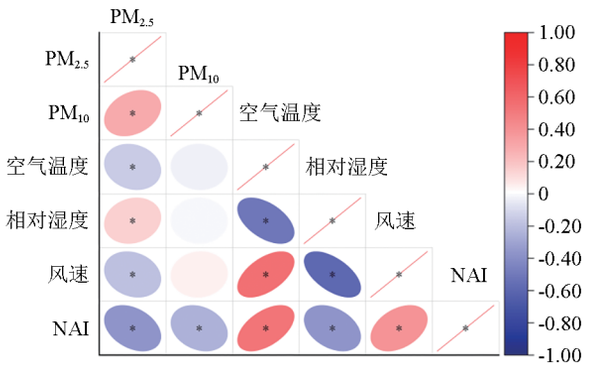


图 6　5—9 月青海云杉林空气负离子浓度日变化

Fig. 6　Concentration of air negative ion in Qinghai spruce forest from May to September

2.5　森林康养环境因子相关性分析

进一步运用 Pearson 相关系数法对森林康养环境因子之间的相关关系进行分析，结果如图 7 所示。空气负离子浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度、PM_{10} 浓度、温度、相对湿度、风速的相关性均显著（$P < 0.05$），空气负离子浓度与温度存在中等强度的正相关关系，与 $PM_{2.5}$ 浓度、PM_{10} 浓度以及相对湿度存在弱强度的负相关关系。$PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、温度、相对湿度以及风速相关性显著（$P < 0.05$），相关关系强度均小于 0.4，呈弱相关。$PM_{2.5}$ 浓度与温度、风速呈负相关关系，PM_{10} 浓度与温度、相对湿度、风速均无显著相关关系。



*, $P < 0.05$.

图 7 青海云杉林康养环境因子的相关性

Fig. 7 Correlation of health and wellness environmental factors in Qinghai spruce forest

3 讨 论

3.1 森林小气候特征与康养适宜性

祁连山青海云杉林的小气候因子（温度、湿度、风速）呈现显著的日动态与月际差异，这与森林生态系统的自身调节功能密切相关。7—8 月的温度（18 ～ 24 ℃）、湿度（45% ～ 65%）和风速（＜ 1 m/s）组合最符合人体舒适需求，综合舒适度指数（*S*）达到非常舒适（Ⅰ级），这与陈家硕 [13] 关于遮阴环境对温湿效应的研究结果一致。森林通过冠层遮阴、蒸腾作用和空气动力学效应，有效缓冲了极端温度波动，形成了夏季凉爽湿润的微气候环境。例如，7 月林内日均温度较外部低 5 ～ 8 ℃，湿度提高 15% ～ 20%，这种调节作用为康养活动提供了理想的物理环境。

从时间分布看，5 月因海拔较高、太阳辐射较弱，温度普遍低于 18 ℃且湿度偏低（平均 40.54%），导致综合舒适度指数（*S*=7.50）处于“不舒适”等级；而 6—9 月随着植物生长季的推进，植被覆盖度增加，小气候调节能力增强，舒适度显著提升。值得注意的是，8 月湿度虽高达 76.18%，但风速较低（平均 0.4 m/s），未形成闷热感，这可能与祁连山高海拔地区的低气压环境有关，印证了钟燕川等 [14] 关于康养气候匹配度的区域差异结论。

3.2 空气质量指标的康养价值

研究区 $PM_{2.5}$ 浓度（2.08 ～ 12.43 μg/m^3）远低于国家一级标准限值（35 μg/m^3），除 5 月以外，6—9 月只有极少天数 PM_{10} 浓度高于国家一级标准，这充分表明青海云杉林具有显著的空气净化功能，为森林康养活动提供了优质的空气环境。5 月 PM_{10} 浓度偏高（54.56 μg/m^3），主要受春季大风沙尘天气和地表扰动（如农事作业）影响，这与王晓磊等 [27] 关于城市森林调控颗粒物的机制一致，森林冠层虽能阻滞部分扬尘，但强风条件下地表裸露会抵消部分净化效果。而 6—9 月，随着植被郁闭度的增加和降水的增多，颗粒物沉降效率提升，PM_{10} 浓度稳定在 25 ～ 35 μg/m^3，体现了森林生态系统对大气环境的长期调节作用。

空气负离子浓度（1 340 ～ 2 610 个 /m^3）是森林康养的核心指标之一，其夏季峰值（7 月均值为 2 365 个 /m^3）达到Ⅰ级标准，与谢雪宇 [11] 在寨场山森林公园的观测结果相近。空气负离子的“双峰”日变化模式（10:00 和 14:00 峰值）与光温条件密切相关，清晨光照逐渐增强，植物光合作用速率提升，氧气释放量增加，有效推动空气离子生成；午后温度升高，空气分子热运动加剧，加速电离过程。此外，风速与空气负离子浓度的正相关（*r*=0.390）表明，适度的空气流动（如＜ 1 m/s 的微风）可促进离子扩散，减少局部复合损耗，这与徐芮韵等 [28] 的研究结论一致。

3.3 环境因子的协同作用机制

Pearson 相关性分析揭示了各康养环境因子之间存在复杂的相互作用关系。空气负离子浓度与温度（*r*=0.524）、风速（*r*=0.390）呈显著正相关，与 $PM_{2.5}$ 浓度（*r*=−0.361）、湿度（*r*=−0.370）呈负相关。这一结果可从物理化学过程解释：温度升高能够提升大气电离率，进而促进空气负离子生成；而高湿度环境中，气溶胶粒子吸湿膨胀，易吸附空气中的负离子，使其寿命缩短 [29]。$PM_{2.5}$ 与风速的负相关（*r*=−0.287）则表明，风速增大可加速污染物扩散，降低颗粒物浓度，体现了森林小气候与空气质量的动态耦合。

值得注意的是，PM_{10} 与温度、湿度的相关性不显著（$P > 0.05$），这可能与粗颗粒物（PM_{10}）主要受地表扬尘等外源输入影响有关，而细颗粒物（$PM_{2.5}$）更易受森林内部生化过程（如植物挥发性有机物）调控。这种分异特征提示，在森林康养功能评估中，有必要区分不同粒径颗粒物的来源途径及其生态效应。

3.4 康养功能的季节分异与实践意义

综合气候舒适度指数（*S*）、空气负离子（NAI）浓度和颗粒物浓度的评价结果，7 月上旬至 8 月中旬被确定为祁连山青海云杉林的最优康养期。该时段兼具Ⅰ级气候舒适度（$S \leqslant 4.55$）、Ⅰ级空气负离子浓度（NAI ⩾ 1 500 个 /m³）和 $PM_{2.5}$ 浓度

低于国家一级标准限值。这一结论为祁连山国家公园的康养资源科学开发与利用提供了直接依据。建议在核心康养期内重点开展森林浴、冥想等静态康养活动，而 5 月和 9 月（气候舒适度等级为Ⅱ级或存在不舒适时段，空气质量除 5 月 PM_{10} 受沙尘影响外总体良好）可作为辅助康养期，适宜开发低强度的生态徒步、自然观察或森林科普教育活动，避免过度依赖单一季节资源，实现森林康养资源的高效利用与可持续发展。

与康海滨等 [23] 关于南方森林康养研究相比，祁连山青海云杉林的独特性在于其高海拔冷凉气候和强季节性，这使得康养期相对集中，但空气质量全年保持较高水平。未来研究可进一步整合植物精气浓度、环境噪声等多类环境监测指标，构建更为系统全面的森林康养功能综合评价体系，同时结合心率变异性、皮质醇水平等人体生理指标开展实证分析，量化验证森林生态环境对人体的实际康养与健康促进效应。

4　结　论

1）祁连山青海云杉林小气候因子（温度、湿度、风速）呈现显著的日变化和月际差异，7—8 月的小气候条件以温度 18 ～ 24 ℃、相对湿度 45% ～ 65%、风速＜ 1 m/s 组合最优，综合舒适度指数（*S*）达到“非常舒适”等级（Ⅰ级，S ≤ 4.55），最适宜康养活动。

2）研究区空气质量优异，$PM_{2.5}$ 浓度（2.08 ～ 12.43 μg/m^3）远低于国家一级标准限值。除 5 月受沙尘影响外，6—9 月 PM_{10} 浓度多低于一级标准限值。

3）空气负离子浓度（1 340 ～ 2 610 个 /m^3）在夏季（7 月）达到峰值且主要时段达到Ⅰ级标准（≥ 1 500 个 /m^3）。

4）综合评价确定 7 月上旬至 8 月中旬为祁连山青海云杉林最优康养期，该时段同时满足了Ⅰ级气候舒适度、Ⅰ级空气负离子浓度和 $PM_{2.5}$ 一级空气质量要求，具备优质的小气候调节、空气净化和空气负离子供给能力，森林康养功效突出。

本研究结果补充了我国西北高海拔森林康养功能的基础数据，为祁连山国家公园生态保护与康养产业协同发展提供了科学依据，亦有助于祁连山国家公园森林康养资源的精准化开发、可持续管理及生态产品价值实现路径的拓展。

参考文献：

[1] 黄洋 , 卢海霞 , 苟锐 . 长江经济带全国森林康养示范基地空间分异 [J]. 江苏农业科学 ,2021,49(14):242-248.
HUANG Y, LU H X, GOU R. Spatial differentiation of national forest health demonstration base in the Yangtze River economic zone[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2021,49(14):242-248.

[2] 王超 , 刘晓岚 . 森林康养旅游政策的量化评价与“十五五”发展展望 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版),2025,19(2):93-106.
WANG C, LIU X L. Quantitative evaluation of forest health and wellness tourism policies and development prospects for the 15th Five-Year Plan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences),2025,19(2):93-106.

[3] 邓三龙 . 森林康养的理论研究与实践 [J]. 世界林业研究 ,2016,29(6):1-6.
DENG S L. Theoretic research and practices of forest health[J]. World Forestry Research,2016,29(6):1-6.

[4] 汪佳慧 , 朱彦丞 , 李旭阳 . 基于植物健康效益的居住区寒地景观优化研究 [J]. 现代园艺 ,2022(21):101-103.
WANG J H, ZHU Y C, LI X Y. Study on optimization of cold landscape in residential area based on plant health benefits[J]. Contemporary Horticulture,2022(21):101-103.

[5] PAN X M, YANG Z P, HAN F, et al. Evaluating potential areas for mountain wellness tourism: a case study of Ili, Xinjiang[J]. Sustainability,2019,11:5668.

[6] LIU L G, ZHOU Y, SUN X. The impact of the wellness tourism experience on tourist well-being: the mediating role of tourist satisfaction[J]. Sustainability,2023,15:1872.

[7] 刘巧辉 , 刘晶岚 , 王小平 . 森林公园游憩者保健游憩体验与健康效益感知研究 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版),2022,16(1):92-99.
LIU Q H, LIU J L, WANG X P. A research on visitor’s healthcare tourism experience and healthcare perception of forest park[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences),2022,16(1):92-99.

[8] ZHANG Z Y, WANG P, GAO Y, et al. Current development status of forest therapy in China[J]. Healthcare,2020,8:61.

[9] 刘思思 , 乔中全 , 金天伟 , 等 . 森林康养科学研究现状与展望 [J]. 世界林业研究 ,2018,31(5):26-32.
LIU S S, QIAO Z Q, JIN T W, et al. Scientific research on forest wellness: review and expectation[J]. World Forestry Research, 2018,31(5):26-32.

[10] 王兆峰 , 史伟杰 , 苏昌贵 . 中国康养旅游地空间分布格局及其影响因素 [J]. 经济地理 ,2020,40(11):196-207.
WANG Z F, SHI W J, SU C G. Spatial pattern of health tourism destination in China and its influence factors[J]. Economic Geography,2020,40(11):196-207.

[11] 谢雪宇 . 基于空气负离子资源的森林公园保健养生项目规划研究——以惠东县寨场山森林公园为例 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2014.
XIE X Y. Research on the planning of healthy slow project in forest park based on negative air ion: taking Huidong Zhaichang mountain forest park as an example[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2014.

[12] 王政 , 杨霞 . 森林康养空间分布特征及其影响因素研究 : 以四川森林康养基地为例 [J]. 林业资源管理 ,2020(2):146-153.

WANG Z, YANG X. Study on the spatial distribution characteristics and influencing factors of forest-based healing and recovery: using forests in Sichuan Province as an example[J]. Forest Resources Management,2020(2):146-153.

[13] 陈家硕 . 延吉城市绿地温湿效应及其对人体舒适性的影响因素分析 [D]. 延边 : 延边大学 ,2022.
CHEN J S. Analysis on temperature and humidity effect of urban green space and its influencing factors on human comfort in Yanji[D]. Yanbian: Yanbian University,2022.

[14] 钟燕川 , 郭海燕 , 蔡怡亨 , 等 . 四川康养气候资源与利用匹配度分析 [J]. 高原山地气象研究 ,2023,43(1):146-150.
ZHONG Y C, GUO H Y, CAI Y H, et al. Matching degree analysis between Sichuan healthy climate resources and utilization[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2023,43(1): 146-150.

[15] 张涵菀漪 , 程晓山 , 刘欣 , 等 . 基于 AHP 的广州市越秀公园康养功能评价分析 [J]. 绿色科技 ,2025,27(1):45-50,55.
ZHANG H W Y, CHENG X S, LIU X, et al. Evaluation and analysis of healthcare function in Yuexiu park, Guangzhou, based on the analytic hierarchy process (AHP) method[J]. Journal of Green Science and Technology,2025,27(1):45-50,55.

[16] 苏玉姣 , 张鹏 , 张晓华 , 等 . 河北武安国家森林公园生态环境质量评价及驱动因子分析 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2023,43(2):197-206.
SU Y J, ZHANG P, ZHANG X H, et al. Ecological environment quality evaluation and driving factor analysis of Wu'an national forest park in Hebei Province[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition),2023,43(2):197-206.

[17] 罗莹 , 贾黎明 , 姚娜 . 京津冀森林游憩资源空间分布特征及其影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(2):166-174.
LUO Y, JIA L M, YAO N. Spatial distribution and its influencing factors of forest recreation resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(2):166-174.

[18] 雷海清 , 孙高球 , 季叶红 , 等 . 文成猴王谷森林康养基地环境因子和气候舒适度变化特征研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2021,41(3):62-68.
LEI H Q, SUN G Q, JI Y H, et al. Study on change characteristics of environmental factors and climate comfort degree in the monkey king valley forest therapy base in Wencheng County[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021,41(3):62-68.

[19] 赵鹏宇 , 刘芳 , 崔嫱 . 山西省康养旅游资源空间分布特征及影响因素 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版),2020,56(4): 112-119.
ZHAO P Y, LIU F, CUI Q. Spatial distribution characteristics of health and wellness tourism resources in Shanxi Province[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2020,56(4):112-119.

[20] 周彦丽 , 王璐璐 , 刘建勇 , 等 . 张家口山地康养气候适宜性评价 [J]. 湖北农业科学 ,2024,63(增刊 1):62-67.
ZHOU Y L, WANG L L, LIU J Y, et al. Evaluation of climate suitability for health recuperation in mountain land of Zhangjiakou[J]. Hubei Agricultural Sciences,2024,63(Suppl. 1): 62-67.

[21] 刘楠 , 魏云洁 , 郑姚闽 , 等 . 北京市森林康养旅游空间适宜性评价 [J]. 地理科学进展 ,2023,42(8):1573-1586.
LIU N, WEI Y J, ZHENG Y M, et al. Spatial suitability of forest-based health and wellness tourism in Beijing[J]. Progress in Geography,2023,42(8):1573-1586.

[22] 刘德军 , 肖晶晶 , 李文明 , 等 . 国家级森林康养试点基地空间分布特征及其驱动机制 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025, 45(3):184-194.
LIU D J, XIAO J J, LI W M, et al. Spatial distribution characteristics and driving mechanisms of national forest wellness pilot bases[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(3):184-194.

[23] 康海滨 , 李衣长 , 李仁忠 , 等 . 基于 GIS 的三明市森林康养基地气候舒适度分析 [J]. 福建林业科技 ,2022,49(1):121-127.
KANG H B, LI Y C, LI R Z, et al. Climatic comfort degree analysis of forest wellness base in Sanming based on GIS[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology,2022,49(1): 121-127.

[24] 管芸 , 唐仲霞 , 陈正逸 . 祁连山国家公园青海片区生态旅游开发适宜性研究 [J]. 干旱区资源与环境 ,2023,37(12):151-161.
GUAN Y, TANG Z X, CHEN Z Y. Evaluation on the suitability of ecotourism development in Qilian mountain national park (Qinghai area)[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(12):151-161.

[25] 袁小康 , 谷晓平 . 旅游气候舒适度指数比较分析 [J]. 贵州气象 ,2013,37(3):7-9.
YUAN X K, GU X P. Comparative analysis of climate comfort index for travelling[J]. Journal of Guizhou Meteorology,2013, 37(3):7-9.

[26] 中国气象服务协会 . 空气负氧离子浓度等级图标 T/CMSA 0029—2022[S].
China Meteorological Services Association. Graphical symbols for grades of air negative oxygen ion concentrationT/CMSA 0029-2022[S].

[27] 王晓磊 , 王成 . 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展 [J]. 生态学报 2014,34(8):1910-1921.
WANG X L, WANG C. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(8):1910-1921.

[28] 徐芮韵 , 龚道程 , 孟鑫鑫 , 等 . 海南热带雨林空气负离子的时空变化规律、影响因素及环境健康评估 [J]. 中国环境科学 , 2025,45(2):657-670.
XU R Y, GONG D C, MENG X X, et al. Spatio-temporal variations, influential factors and environmental health assessment of negative air ions(NAIs) in Hainan tropical rainforests[J]. China Environmental Science,2025,45(2):657-670.

[29] 贺晨昕 , 李星敏 , 董自鹏 , 等 . 气溶胶吸湿性及其对霾形成的影响研究进展 [J]. 陕西气象 ,2024(3):9-16.
HE C X, LI X M, DONG Z P, et al. Progress in the study of the hygroscopicity of aerosols and their impact on haze formation[J]. Journal of Shaanxi Meteorology,2024(3):9-16.

[本文编校：谢荣秀]