

森林康养共享模式下生态环境及资源优化研究

李伟成^{1,2}, 楼毅^{3*}, 郑彦超³

(1. 国家林业和草原局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江省竹子高效加工重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 国家林业和草原局华东调查规划设计院, 浙江 杭州 310019)

摘要: 基于分层抽样法、非度量多维标度排序和皮尔逊相关性分析等方法对浙江庆元国家森林公园康养资源进行研究。结果显示,挥发性有机物与常绿阔叶林呈正相关,与杉木林、黄山松林等森林类型呈负相关;与湿度、温度、灌草覆盖率等环境因子呈正相关,与乔木层盖度呈负相关。四氯乙烯与杉木黄山松混交林呈正相关,与阔叶林呈负相关;与温度、湿度等环境因子呈负相关,表明不同森林类型的森林康养环境差异显著。相关性分析显示,针叶林、阔叶林、竹林的主要森林康养指标具有显著差异。在森林康养资源共享优化中,针对不同森林资源类型分别构建负氧离子康养、运动休闲、探险旅游相结合的资源共享模式,以及与林果、林茶、林药等产业相融合的资源优化模式。

关键词: 森林康养;共享模式;资源优化;环境要素;庆元国家森林公园

中图分类号:S718.5

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)05-0021-05

Study on Eco-environment Analysis and Resource Optimization of Forest Resources under Forest Therapy Sharing Model

LI Wei-cheng^{1,2}, LOU Yi^{3*}, ZHENG Yan-chao³

(1. China National Bamboo Research Center, Hangzhou, Zhejiang 310012, China; 2. Key Laboratory of High Efficient Processing of Bamboo of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310012, China; 3. East China Forest Inventory and Planning Institute, Hangzhou, Zhejiang 310019, China)

Abstract: Based on stratified sampling, non-metric multidimensional scaling (NMDS) and Pearson correlation analysis, the resources of forest therapy in Qingyuan National Forest Park were studied. The results showed that volatile organic compounds were positively correlated with evergreen broad-leaved forests, humidity, temperature, shrub and grass coverage (GC), while negatively correlated with Huangshan pine, fir and arbor coverage. Perchloroethylene was positively correlated with the mixed forests of Huangshan pine and fir, while negatively correlated with broad-leaved forest, temperature and humidity. This indicated that different forest types of forest therapy environment were significantly different. In sharing and optimization of forest therapy resource, it was proposed to build a sharing model of combining the resources of negative oxygen ion therapy, sports and leisure and adventure tourism, and a resource optimization model of integrating forest with the industries of fruit, tea and Chinese herbal medicine.

Key words: Forest therapy; Sharing mode; Resource optimization; Environmental elements; Qingyuan National Forest Park

森林康养是以森林生态环境为基础,以促进大众健康为目的,开展保健养生、康复疗养、健康养老的服务活动^[1-3]。19世纪初,Konrad Anton Zwierein首次提出“福利理论”^[4-5],其后德国首先开始森林康养相关理论的研究,目前森林康养主要有以

收稿日期:2020-08-28;修订日期:2021-07-11

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目(CAFYBB2018MB009)

作者简介:李伟成(1978—),男,浙江湖州人,副研究员,博士,主要从事系统生态学方面的研究。

*通信作者:楼毅 E-mail: kexueyuan2010@163.com

美国为代表的森林保健模式和以日本为代表的森林浴模式^[6-7]。我国的森林康养理论研究起步较晚,目前主要有以邓三龙、吴兴杰为代表的狭义康养理论和以邓朝望、吴后建为代表的广义康养理论^[8-9],森林康养产业处在以森林旅游式疗养为主的初级阶段^[10-13],森林康养理论和产业还未充分得到发展^[14-16]。森林康养资源共享模式的研究也主要集中于康养基地共享模式的定性评价,森林类型与生态因子相关性方面缺乏深入研究,如何创新森林康养模式,构建森林康养共享模式已成为森林康养研究领域的热点^[17-19]。今以浙江庆元国家森林公园为样本,结合森林康养相关研究资料,从定量和定性的角度分析森林康养共享模式下的森林类型与生态因子相关性,并提出森林康养资源优化模式。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

浙江庆元国家森林公园位于浙江省庆元县西部,地理位置为 E118° 53' 17" ~ E119° 02' 07", N27°32'37" ~ N27°42'04",总面积约 2 455.73 hm²。该森林公园属亚热带季风气候区,温暖湿润,年平均气温 17.2 ℃,年平均相对湿度为 70%;公园内有自然资源 61 个,人文资源 16 个。庆元森林公园植被分区属中亚热带常绿阔叶林地带,公园内木本植物共计 88 科 251 属 547 种,森林类型主要有针叶林(黄山松林、马尾松林、杉木林等),针阔混交林(马尾松+阔叶树混交林、黄山松+阔叶树混交林、杉木+阔叶树混交林等),天然常绿阔叶次生林(甜槠、米槠、栲树林、木荷、青冈、红楠林等),常绿落叶阔叶混交林(木荷、锥栗、光皮桦林等阔叶混交林)和竹林。

1.2 样地调查

依据植被区划、森林起源、龄组、郁闭度、优势树种(组)等要素,采取分层抽样法在森林公园内布设 39 个 20 m × 20 m 样地,于 2019 年 5 月进行样地调查,调查因子包括群落类型、群落结构、群落郁闭度等,调查同时对乔木进行每木检尺,记录乔木种类、高度、株数、胸径、冠幅;记录灌木和草本的高度、盖度、种类。

1.3 研究方法

采用气相色谱质谱联用分析法检测样地挥发性有机物(VOC),采用 DNPH 固相衍生-液相色谱法测定环境四氯乙烯(PCE)^[20]。采用非度量多维标度(NMDS)排序方法研究不同林区环境因子变化的差异。采用 SPSS 20.0 统计软件对环境因子与林分组成进行皮尔逊相关性分析,并通过 CANOCO 5.0 软件对森林结构和环境因子进行主成分分析(PCA)。

2 结果与讨论

2.1 森林结构与生态因子相关性分析

2.1.1 样地的生态因子现状

依据《林业资源分类与代码 森林类型》(GB/T 14721—2010),庆元国家森林公园森林资源被分成 8 种类型,不同森林类型的生态因子见表 1。

VOC 会对人体皮肤、呼吸道、心脑血管等产生危害,是重点考虑的康养因子。PCE 是最常见的污染物之一,PCE 及其降解产物具有致癌作用,也是森林康养环境营造中需要重点考虑的环境因子。由表 1 可知,VOC 平均质量浓度最高为毛竹林,最低为黄山松林;PCE 平均质量浓度最高为杉木黄山松混交林,其次是杉木林,最低为常绿落叶阔叶

表 1 庆元国家森林公园不同森林类型的生态因子

Table 1 Ecological factors of different forest types in Qingyuan National Forest Park

| 森林类型 | 群落郁闭度 | 海拔 h/m | 乔木层高度 h/m | 乔木层盖度 | 灌木高度 h/m | 灌木覆盖率 | 灌草覆盖率 | 灌草厚度 d/m | 温度 θ/℃ | 湿度/% | PCE ρ/(μg·m ⁻³) | VOC ρ/(μg·m ⁻³) |
|----------|-------|----------|-----------|-------|----------|-------|-------|----------|--------|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| 常绿阔叶林 | 0.79 | 887.94 | 13.39 | 0.73 | 1.37 | 0.32 | 0.50 | 1.37 | 24.09 | 62.04 | 11.69 | 76.96 |
| 常绿落叶阔叶林 | 0.83 | 664.61 | 13.11 | 0.71 | 1.21 | 0.31 | 0.61 | 1.22 | 24.52 | 68.72 | 10.27 | 78.76 |
| 落叶阔叶林 | 0.79 | 1 044.32 | 13.32 | 0.77 | 1.47 | 0.34 | 0.46 | 1.46 | 24.94 | 56.69 | 11.98 | 67.14 |
| 针阔混交林 | 0.83 | 631.60 | 13.93 | 0.71 | 1.08 | 0.37 | 0.66 | 1.10 | 21.71 | 73.71 | 10.69 | 69.08 |
| 黄山松林 | 0.77 | 1 250.00 | 13.33 | 0.77 | 1.48 | 0.34 | 0.35 | 1.48 | 22.68 | 54.89 | 12.46 | 64.48 |
| 杉木林 | 0.81 | 955.75 | 13.69 | 0.79 | 1.34 | 0.33 | 0.48 | 1.33 | 26.28 | 56.69 | 14.43 | 73.43 |
| 杉木黄山松混交林 | 0.84 | 1 215.25 | 14.00 | 0.84 | 1.25 | 0.39 | 0.41 | 1.25 | 23.66 | 53.03 | 15.56 | 66.43 |
| 毛竹林 | 0.77 | 952.74 | 12.93 | 0.74 | 1.34 | 0.35 | 0.47 | 1.33 | 24.31 | 59.85 | 11.64 | 81.77 |

林。参照《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分:化学有害因素》(GBZ 2.1—2007)发现,森林公园内各森林类型中 VOC 各组分质量浓度均比职业接触限值小二三个数量级,PCE 比职业接触限值小 1 个数量级。

2.1.2 样地生态因子与林分结构的相关性分析

图 1 为森林类型与生态因子的 PCA 分析结果。由图 1 可见,黄山松林、杉木林等针叶林主要分布在第一和第四象限;针阔混交林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶林、毛竹林、落叶阔叶林主要分布在第二和第三象限。阔叶林与 VOC、温度、湿度等生态因子呈正相关;针叶林与 PCE 呈正相关;毛竹林与 VOC、温度、湿度呈正相关,与 PCE 呈负相关。

PCA 分析显示,VOC 与常绿阔叶林呈正相关,与杉木林、黄山松林等森林类型呈负相关;与湿度、温度、灌草覆盖率等环境因子呈正相关,与乔木层盖度呈负相关。PCE 与杉木黄山松混交林呈正相关,与阔叶林呈负相关;与温度、湿度等环境因子呈负相关。

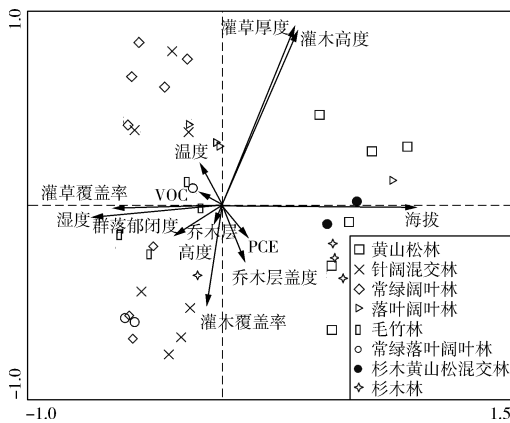


图 1 森林类型与生态因子的 PCA 分析结果

Fig. 1 Results of forest types and ecological factors by PCA

NMDS 结果显示,杉木林和黄山松林环境因子表现出较高的相似性;针阔混交林和常绿阔叶林环境因子相似;毛竹林和落叶阔叶林环境有一定的相似性。皮尔逊相关性分析结果显示,群落郁闭度与乔木层盖度在 0.01 水平(双侧)呈正相关;灌木高度、灌草厚度与海拔在 0.05 水平(双侧)呈正相关,灌草覆盖率为海拔在 0.01 水平(双侧)呈负相关;湿度与海拔、温度在 0.01 水平(双侧)呈负相关,与灌草覆盖率为 0.01 水平(双侧)呈正相关,

与灌木高度在 0.05 水平(双侧)呈负相关。

2.2 森林康养资源共享模式下的生态风险分析

2.2.1 森林康养资源共享模式 SWOT 分析

分别从优势、劣势、威胁和机会等 4 个方面对森林康养资源共享模式进行 SWOT 分析,对森林康养资源共享模式作全面、系统、准确的评估。①优势。森林康养资源共享可以充分整合资源、挖掘康养资源潜力,实现绿色发展和多元共赢。②劣势。森林康养理论研究较少,森林康养资源定量分析不足,资源优化整合度低,模式不成熟。③威胁。森林康养资源共享模式容易造成生态承载力超载,带来生态破坏、生物多样性丧失、水土流失、生态退化的风险;资源共享过程中容易出现利益优先、保护滞后,过度商业化和过度开发森林资源的危险。④机会。森林康养共享模式面临着森林生态价值和服务价值新发现的机会。

2.2.2 共享模式下森林康养资源生态风险分析

森林康养共享模式与传统康养模式不同,传统康养模式往往关注的是单一康养主体,以满足人们的单一需要为主;而森林康养共享模式是利用现有森林资源,针对区域资源特点和不同康养人群、不同康养需求,开发集多种形式于一体的森林康养产品。基于综合开发构建的共享模式面临着两种风险,即森林资源不合理规划带来的资源浪费和森林资源过度开发造成的生态退化。首先,森林康养资源丰富多样,需要针对不同的资源条件,走差异化发展的路线。对不同林分生态因素研究不够深入,就不能制定具有针对性的康养规划,造成康养对象错误、康养效果不佳,进而造成森林资源的浪费。其次,森林康养基地共享模式虽然能够充分利用森林资源,但是不科学的资源利用方式和强度会带来生态风险。其一是不统筹考虑森林生态承载能力和发展潜力,会导致过度开发森林资源、林地破坏、生境破碎、物种多样性下降的风险;其二是不合理的森林抚育带来外来物种入侵、伴人植物增加的风险。

2.3 森林康养资源的共享优化

2.3.1 合理规划森林康养资源

(1) 针叶林康养资源优化。庆元国家森林公园的针叶林主要分布于海拔相对较高区域,与 PCE 呈正相关,与温度、湿度、VOC 等呈负相关,故针叶林康养资源优化应着重构建芳香烃疗法、运动休闲、观光游、林下经济相结合的资源共享模式。一

是针对低海拔的针叶林,规划建设康养步道,在开阔地段设置森林浴场,策划松林瑜伽、太极拳、自然冥想等康体活动项目;二是针对高海拔负氧离子含量高的针叶林(侧柏林、油松林),规划运动休闲区,通过吸收山谷内植物精气和高浓度的负氧离子,达到康体养生的目的。此外,利用针叶林开展森林康养的同时应发展林下经济,主要构建林果、林菌模式,进而全面整合优化针叶林资源。

(2)阔叶林康养资源优化。庆元国家森林公园的阔叶林与VOC、湿度、温度呈正相关,与PCE呈负相关,故在森林康养资源优化利用过程中,需要重点考虑与阔叶林密切相关的康养生态因子。一是在林木高大、香气浓厚、飞鸟众多的林分和有瀑布、山泉、溪流、湖泊的地方,规划森林浴场和空气负离子呼吸区,同时在康养区四周建设健康步道,发展养生为主的康养产业。二是针对落叶阔叶林可以采取森林康养+森林民宿的康养资源共享模式,其主要以良好的森林生态环境和森林村庄、古村落等为依托,丰富周边珍贵彩色树种,营造乔灌搭配合理、生态环境良好的氛围,从而进行森林资源优化。

(3)竹林康养资源优化。庆元国家森林公园的竹林与湿度、温度呈正相关,故对于竹林资源的整合优化应以康养、旅游、林下经济共同发展为主。一是通过优化整合竹资源,打造呼吸负氧离子的慢休闲文化康养模式,辅以茶文化、竹文化、孝文化等多元文化类型,为森林康养基地营造出清雅、禅意的文化境界和安逸休闲的文化氛围。二是通过整合优化竹林景观,结合竹林的立地条件建设特色森林景观,如在竹林之间镶嵌营造嵌着小块的马尾松次生林、常绿阔叶林或针阔混交林等,综合利用竹资源。

2.3.2 科学经营森林康养资源

庆元国家森林公园森林康养的生态因子与森林结构、林分组成、群落郁闭度、灌木覆盖率、灌草覆盖率、乔木层盖度等密切相关,故森林康养资源优化除依据林分和森林生态现状合理规划森林资源、构建森林资源康养共享模式以外,还须采取科学方法进行森林资源经营,调整森林结构,进行森林康养资源优化。其一,遵循森林生态系统健康理念,实施林相改造、森林抚育和珍贵树种培育等林业工程,全面优化森林景观和生态环境;强化森林资源基础建设,建设专项森林康养养生林、疗养林、

康复林和休闲林。其二,通过森林抚育、更新等森林经营措施,调整林分密度、优化林分结构,建设美好的森林自然资源。其三,结合功能布局,有针对性地营造、补植景观类和芳香类植物,提升康养林疗养功能。

3 结论

(1)不同森林类型的生态环境因子具有明显的差异,其主要森林康养指标也具有显著差异。不同海拔和树种组成的森林湿度差异显著。

(2)森林类型和森林主要康养因子具有显著相关性。主成分分析显示VOC与常绿阔叶林呈正相关,与杉木林、黄山松林等森林类型呈负相关;与湿度、温度、灌草覆盖率等环境因子呈正相关,与乔木层盖度呈负相关。PCE与杉木黄山松混交林呈正相关,与阔叶林呈负相关;与温度、湿度等环境因子呈负相关。相关性分析表明:湿度与海拔、温度呈负相关,与灌草覆盖率呈正相关,与灌木高度呈负相关。

(3)森林康养基地的构建应根据森林环境差异性开发建设适应不同康养需求的森林康养产品。森林康养资源共享应根据森林资源生态环境差异和康养用途合理开发,构建差异化的森林康养资源共享模式。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 吴后建, 但新球, 刘世好, 等. 森林康养: 概念内涵、产品类型和发展路径[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2159-2169.
- [3] 刘照, 王屏. 国内外森林康养研究进展[J]. 湖北林业科技, 2017, 46(5): 53-58.
- [4] LEE J H, BÜRGER-ARNDT R. Characteristics of forest-based recreation in Korea and the case of natural recreation forests[J]. Life Science Journal, 2013, 10(3): 739-747.
- [5] 陈晓丽. 森林疗养功效及应用案例研究——以日本、韩国为例[J]. 绿色科技, 2017(15): 234-236.
- [6] 王燕琴, 陈洁, 顾亚丽. 浅析日本森林康养政策及运行机制[J]. 林业经济, 2018, 40(4): 108-112.
- [7] MIYAZAKI Y, IKEI H, SONG C. Forest medicine research in Japan[J]. Nippon Eiseigaku Zasshi (Japanese Journal of Hygiene), 2014, 69(2): 122-135.
- [8] 束怡, 楼毅, 张宏亮, 等. 我国森林康养产业发展现状及路径探析——基于典型地区研究[J]. 世界林业研究, 2019, 32(4): 51-56.
- [9] 黄金凤, 曹玉昆. 黑龙江重点国有林区森林康养产业发展模

- 式研究[J]. 林业科技, 2019, 44(2): 47-49.
- [10] 张涛, 胡冠九, 邓爱萍, 等. 基于健康的环境监测技术规范研究[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(1): 1-4.
- [11] 冯嗣兴, 刘泽东, 周守义. 森林疗养功能的探讨[J]. 中国林业, 2011(1): 57.
- [12] LI Q, KAWADA T. Effect of forest therapy on the human psychoneuro-endocrino-immune network [J]. *Nippon Eiseigaku Zasshi (Japanese Journal of Hygiene)*, 2011, 66(4): 645-650.
- [13] MAO G X, CAO Y B, LAN X G, et al. Therapeutic effect of forest bathing on human hypertension in the elderly[J]. *Journal of Cardiology*, 2012, 60(6): 495-502.
- [14] 杨利萍, 孙浩捷, 黄力平, 等. 森林康养研究概况[J]. 林业调查规划, 2018, 43(2): 161-166.
- [15] 郝冬梅. 基于森林康养理念的产业发展思考——以栾川县为例[J]. 林业科学, 2018, 22(18): 98-99.
- [16] KUO I L. The effectiveness of environmental interpretation at resource-sensitive tourism destinations[J]. *International Journal of Tourism Research*, 2002, 4(2): 87-101.
- [17] 蒋泓峰. 发展森林康养 共享绿色红利[J]. 中国林业产业, 2018(10): 22-26.
- [18] PARK B J, TSUNETSUGU Y, KASETANI T, et al. The physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the forest atmosphere or forest bathing): evidence from field experiments in 24 forests across Japan [J]. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2010, 15(1): 18-26.
- [19] 潘洋刘, 刘苑秋, 曾进, 等. 基于康养功能的森林资源评价指标体系研究[J]. 林业经济, 2018, 40(8): 53-57.
- [20] 范智超, 王斐, 和莹, 等. 环境空气中多种羰基化合物的测定[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(2): 43-45.

本栏目编辑 谢咏梅

(上接第20页)

- [2] 周杰, 杨鹏, 吕文生, 等. 小波方差分析北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度序列周期特征[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(6): 19-22.
- [3] LIANG X, ZOU T, GUO B, et al. Assessing Beijing's $PM_{2.5}$ pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 471(2182): 257-268.
- [4] WANG Z F, LI J, WANG Z, et al. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(1): 3-13.
- [5] 安俊岭, 李健, 张伟, 等. 京津冀污染物跨界输送通量模拟[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2684-2692.
- [6] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1361-1368.
- [7] 赵晴, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京及周边地区夏季大气颗粒物区域污染特征[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 1873-1880.
- [8] 王晓琦, 郎建全, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3211-3217.
- [9] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 4897-4904.
- [10] 薛文博, 雷宇, 许艳玲, 等. 2000—2016年气象条件变化对全国 $PM_{2.5}$ 污染影响数据集[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [11] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013—2017年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J]. 中国科学(地球科学), 2020, 50(4): 483-500.
- [12] ZHANG Q, ZHENG Y X, TONG D, et al. Drivers of improved $PM_{2.5}$ air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(49): 24463-24469.
- [13] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 2016年北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [14] RAO S T, ZURBENKO L G. Detecting and tracking changes in ozone air quality [J]. *Air & Waste*, 1994, 44(9): 1089-1092.
- [15] ZURBENKO I, PORTER P S, RAO S T, et al. Detecting discontinuities in time series of upper air data: Development and demonstration of an adaptive filter technique [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(12): 3548-3560.
- [16] 白鹤鸣, 师华定, 高庆先, 等. 基于气象调整的京津冀典型城市空气污染指数序列重建[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 44-49.
- [17] U. S. EPA. Guidance on the use of models and other analyses in attainment demonstrations for the 8-hour ozone NAAQS: EPA-454/R-05-002 [R]. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards, 2005.
- [18] ZHANG X Y, ZHONG J T, WANG J Z, et al. The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(8): 5991-5999.
- [19] CHENG N L, CHEN Z Y, SUN F, et al. Ground ozone concentrations over Beijing from 2004 to 2015: Variation patterns, indicative precursors and effects of emission-reduction [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 262-274.
- [20] UNEP. A review of air pollution control in Beijing, 1998—2013 [R]. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP), 2018.
- [21] CHANG X, WANG S X, ZHAO B, et al. Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 4843-4858.
- [22] LANG J L, CHENG S Y, LI J B, et al. A monitoring and modeling study to investigate regional transport and characteristics of $PM_{2.5}$ pollution [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, 13(3): 943-956.
- [23] 李慧杰, 王秀兰, 王计平, 等. 2013—2017年间京津冀地区空气质量及影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(2): 21-25.