

宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统 净化大气环境功能

刘胜涛¹ 牛香^{1,2,3*} 王兵^{1,2,3} 宋庆丰¹ 陶玉柱¹ 王慧^{1*}

(¹ 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; ² 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

³ 北京林业果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206)

摘要 探究宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气功能的空间分布格局, 可为保护区森林生态系统经营管理提供指导。本研究从提供负离子、吸收二氧化硫、吸收氟化物、吸收氮氧化物、滞尘、滞纳 PM₁₀ 和滞纳 PM_{2.5} 等 7 个方面, 从水平分布和垂直梯度两个方向, 对宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能的空间格局进行评价。结果表明: 宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能显著, 提供负离子量为 $1.426 \times 10^{23} \text{个} \cdot \text{a}^{-1}$, 滞纳 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 量分别为 361.27 和 $77.44 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; 在水平分布上, 物质量和价值量均呈现出中部高, 南部次之, 北部最小的变化规律, 5 个保护管理站的森林生态系统净化大气环境功能物质量和价值量均呈现大水沟 > 马莲口 > 苏峪口 > 石嘴山 > 红果子的变化规律; 在垂直梯度上, 呈现 2400~3000 m 段高于 3000~3500 和 1800~2400 m 段, 山体阴坡高于阳坡的分布规律, 以灌木林和云杉林的生态系统服务功能最大。

关键词 大气环境; 水平方向; 垂直梯度; 贺兰山

Air purification function of forest ecosystem in Helanshan Nature Reserve of Ningxia. LIU Sheng-tao¹, NIU Xiang^{1,2,3*}, WANG Bing^{1,2,3}, SONG Qing-feng¹, TAO Yu-zhu¹, WANG Hui^{1*} (¹Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; ³Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206, China).

Abstract: Assessing spatial distribution of air quality purification functions of forest ecosystems can provide reference for ecosystem management. From aspects of negative iron supply, absorption of SO₂, absorption of fluorine, absorption of NO_x, dust retention, PM₁₀ retention and PM_{2.5} retention, we examined the spatial pattern of air quality purification functions of the forest ecosystems in Helanshan Nature Reserve along the horizontal and vertical gradients. Results showed that air quality purification function of the forest ecosystems in the reserve was substantial, with negative iron supply being $1.426 \times 10^{23} \cdot \text{a}^{-1}$, PM₁₀ retention and PM_{2.5} retention being 361.27 and $77.44 \text{t} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. In the horizontal direction, the substance amount and capital value of the forest ecosystems was the highest in the central of the reserve, followed by the south, and least in the north. Both substance amount and capital value in the five management stations of the reserve were in order of Dashuigou > Maliankou > Suyukou > Shizuishan > Hongguozi. On the vertical gradient, the substance amount and capital value of the forest ecosystems were higher at the altitude of 2400–3000 m than at 3000–3500 and 1800–2400 m, and were higher on the shady slope than on the sunny slope. With respect to forest types, the air quality purification function of shrubs and spruce forests was the largest.

Key words: air quality; horizontal direction; vertical gradient; Helanshan.

国家重点研发计划(2017YFC0503804)、中国森林核算及纳入绿色经济评价研究(2017-R28)和科技创新服务能力建设-科研基地建设-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2018_014207_000024)资助。

收稿日期: 2018-05-18 接受日期: 2018-11-19

* 通讯作者 E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

森林生态系统是陆地生态系统的主体,在地球上分布范围广阔,不仅能够为人类提供大量的林副产品,也为人类带来了巨大的物质财富和精神财富(余新晓等,2005;Goldsmith *et al.*,2015;刘胜涛等,2017)。因此,森林生态系统的兴衰不仅直接影响生态环境,同时也影响着经济和社会的发展(马志波等,2014;朱颖等,2015;Jia *et al.*,2015;国家林业局,2015)。随着经济的发展,科学的进步,生态文明的建设,人们逐渐认识到森林已经不再仅仅是为人类提供木材和其他林业产品,其带来的生态效益和社会效益远远超过其带来的直接经济效益(欧阳志云等,1999;牛香,2012;Melvin *et al.*,2015)。在生态环境日益被重视的今天,人们对天蓝、水清、地绿和干净空气等生态环境的需求越来越强烈,对健康生活越来越渴望(李育才,2009;修珍珍等,2013;Carmacho-Valdaz *et al.*,2014)。如何加强林业生态建设,最大限度地发挥森林生态系统净化大气环境的功能已成为人们最关注的热点问题之一(Winter *et al.*,2009;孙清琳等,2015;何海军等,2015)。对这一功能客观、准确的评价,对于增强人们对森林更加直观的认识,对于科学经营与管理森林资源具有重要的现实意义(Liu *et al.*,2009;周鸿升等,2014;Ray *et al.*,2015;宋庆丰等,2015)。

宁夏贺兰山位于宁夏西北部,呈东南西北分布,这一天然屏障历史地承担着阻挡沙漠东侵,保卫银川平原绿洲安全的责任,并有效地阻挡腾格里沙漠的东移和冬冷夏湿气流的南来北往,明显地减弱了水土流失与洪水暴发,既涵养水源,调节气候,又净化了空气,减少了大气中沙尘及有毒有害物质的含量(Liu *et al.*,2017)。对宁夏贺兰山的保护不仅是因为它的资源价值,更重要的原因是它的存在,为银川平原形成了一道天然的生态屏障,保障了银川平原的生态安全,提供了健康清洁的大气环境,保护了人们的身体健康(牛香等,2012;Pang *et al.*,2013)。因此,对于宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能的评估,能够加深人们对于宁夏贺兰山自然保护区森林的关注,增强人们对保护区森林的重视程度,指导保护区森林的经营和管理。

在国家日益重视生态环境保护的今天,尤其是在甘肃祁连山生态环境破坏事件之后,对于自然保护区生态环境状况的了解和评估,尤其是对于保护区重点生态功能的认识显得尤为重要和必需。本文

依据中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)和中华人民共和国国家标准《森林生态系统长期定位观测方法》(GB/T 33027-2016),依托宁夏贺兰山森林生态系统定位观测研究站及周边辅助观测点,采用宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统定位研究站的森林生态连清数据集及森林资源二类调查和2014年保护区林地资源变更调查结果数据,对宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能进行物质和价值量评估,探究其功能的空间格局,以期能够引起人们的重视,提高人们的生态环境保护意识,为宁夏贺兰山自然保护区森林的经营、管理提供指导,为同类型的自然保护区及单个山体的评估研究提供参考和科学依据。

1 研究区概况

宁夏贺兰山自然保护区位于贺兰山脉东坡的北段和中段,地跨银川市、石嘴山市、永宁县、贺兰县、平罗县、惠农县,北起麻黄沟,南至三关口,西到分水岭,东至沿山脚下。地理坐标为 $105^{\circ}49'E-106^{\circ}41'E,38^{\circ}19'N-39^{\circ}22'N$,是半荒漠草原与荒漠之间的分界线,具有典型的大陆性气候特征。全年干旱少雨,寒暑变化强烈,日照强,无霜期短。年平均气温 $-0.8^{\circ}C$,极端最高温度 $25.2^{\circ}C$,极端最低温度 $-31^{\circ}C$ 。年平均降水量在 $200\sim 400\text{ mm}$,降水的年内分配极不均匀,全年降水量主要集中在7—9月。

宁夏贺兰山山地自然条件和植物区系组成复杂多样,植被类型丰富。保护区林地总面积为 193535.67 hm^2 ,有林地面积 18992.23 hm^2 ,占宁夏贺兰山自然保护区林地总面积的 9.81% ;疏林地面积和灌木林地面积分别为 7693.44 和 9014.05 hm^2 ,各占林地总面积的 3.98% 和 4.46% ;宜林荒山荒地 157835.97 hm^2 。

2 数据来源与方法

2.1 数据的来源

评估所采用的数据源包括:①森林生态连清数据集:宁夏贺兰山国家级自然保护区及周边的3个森林生态站和6个辅助观测站点的长期监测数据(图1);②森林资源连清数据集:宁夏贺兰山国家级自然保护区森林资源二类调查及2014年林地变更

调查结果数据;③社会公共数据集:国家权威部门以及宁夏回族自治区公布的社会公共数据,根据贴现率将非评估年份价格参数转换为2014年现价。

2.2 评估指标的选取及计算公式

本研究依据中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008),对宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能进行物质和价值量的评估计算,其指标体系、计算方法及公式详见表1(国家林业局,2008;中国森林资源核算研究项目组,2015;师贺雄,2016)。

表1 宁夏贺兰山自然保护区森林净化大气环境功能评估指标体系及计算公式

Table 1 Evaluation index system and calculation formula of air quality purifying function

| 评估指标 | 计算公式 | 参数说明 |
|---|---|---|
| 提供负离子 负离子价值 | $G_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} A \cdot H \cdot Q_{\text{负离子}} \cdot F/L$ $U_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} A \cdot H \cdot K_{\text{负离子}} \cdot (Q_{\text{负离子}} - 600) \cdot F/L \cdot d$ | $G_{\text{负离子}}$ 为实测年提供负离子价值, $\text{个} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{负离子}}$ 为实测年提供负离子价值, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{负离子}}$ 为负离子生产费用, $\text{元} \cdot \text{个}^{-1}$; H 为林分平均高度, m ; $Q_{\text{负离子}}$ 为林分中负离子浓度, $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; L 为负离子在空气中的存活时间, min ; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 吸收二氧化硫 吸收二氧化硫价值 | $G_{\text{二氧化硫}} = Q_{\text{二氧化硫}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{二氧化硫}} = K_{\text{二氧化硫}} \cdot Q_{\text{二氧化硫}} \cdot A \cdot F \cdot d$ | $G_{\text{二氧化硫}}$ 为实测年吸收二氧化硫总量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{二氧化硫}}$ 为实测年吸收二氧化硫产生的价值量, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{二氧化硫}}$ 为二氧化硫的治理费用, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{\text{二氧化硫}}$ 为单位面积森林二氧化硫吸收量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 吸收氟化物 吸收氟化物价值 | $G_{\text{氟化物}} = Q_{\text{氟化物}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{氟化物}} = K_{\text{氟化物}} \cdot Q_{\text{氟化物}} \cdot A \cdot F \cdot d$ | $G_{\text{氟化物}}$ 为实测年吸收氟化物总量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{氟化物}}$ 为实测年吸收氟化物产生的价值量, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{氟化物}}$ 为氟化物的治理费用, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{\text{氟化物}}$ 为单位面积实测林分氟化物吸收量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 吸收氮氧化物 吸收氮氧化物价值 | $G_{\text{氮氧化物}} = Q_{\text{氮氧化物}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{氮氧化物}} = K_{\text{氮氧化物}} \cdot Q_{\text{氮氧化物}} \cdot A \cdot F \cdot d$ | $G_{\text{氮氧化物}}$ 为实测年吸收氮氧化物的量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{氮氧化物}}$ 为实测年吸收氮氧化物产生的价值量, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{氮氧化物}}$ 为氮氧化物治理费用, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{\text{氮氧化物}}$ 为单位面积森林氮氧化物吸收量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 滞尘 滞尘价值 | $G_{\text{滞尘}} = Q_{\text{滞尘}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{滞尘}} = [C_{\text{PM}_{2.5}} \cdot P_{\text{PM}_{2.5}} \cdot Q_{\text{滞尘}} + K_{\text{滞尘}} \cdot (1 - P_{\text{PM}_{2.5}}) Q_{\text{滞尘}}] \cdot A \cdot F \cdot d$ | $G_{\text{滞尘}}$ 为实测年滞尘量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{滞尘}}$ 为实测林分年滞尘价值, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{滞尘}}$ 为降尘清理费用, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{\text{滞尘}}$ 为单位面积林分年滞尘量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; $C_{\text{PM}_{2.5}}$ 为由 $\text{PM}_{2.5}$ 所造成的健康危害损失, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $P_{\text{PM}_{2.5}}$ 为单位面积实测林分年滞尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 所占的比例, $\%$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 吸滞 吸滞 TSP 价值 | $G_{\text{TSP}} = Q_{\text{TSP}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{TSP}} = K_{\text{滞尘}} \cdot Q_{\text{滞尘}} \cdot P_{\text{TSP}} \cdot A \cdot F \cdot d$ | G_{TSP} 为实测年滞 TSP 量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; U_{TSP} 为实测林分年滞 TSP 价值, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $K_{\text{滞尘}}$ 为降尘清理费用, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{\text{滞尘}}$ 为单位面积林分年滞尘量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; P_{TSP} 为单位面积实测林分年滞尘中 TSP 所占的比例, $\%$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 价值 | $G_{\text{PM}_{2.5}} = Q_{\text{PM}_{2.5}} \cdot P_{\text{PM}_{2.5}} \cdot A \cdot F/1000$ $U_{\text{PM}_{2.5}} = C_{\text{PM}_{2.5}} \cdot P_{\text{PM}_{2.5}} \cdot Q_{\text{滞尘}} \cdot A \cdot F \cdot d$ | $G_{\text{PM}_{2.5}}$ 为实测年滞 $\text{PM}_{2.5}$ 量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; $U_{\text{PM}_{2.5}}$ 为实测林分年滞 $\text{PM}_{2.5}$ 价值, $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$; $Q_{\text{滞尘}}$ 为单位面积林分年滞尘量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; $C_{\text{PM}_{2.5}}$ 为由 $\text{PM}_{2.5}$ 所造成的健康危害损失, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; $P_{\text{PM}_{2.5}}$ 为单位面积实测林分年滞尘中 $\text{PM}_{2.5}$ 所占的比例, $\%$; A 为林分面积, hm^2 ; F 为森林生态功能修正系数; d 为贴现率 |
| 修正系数 | $F = BEF \cdot V/B_0$ | F 为森林生态功能修正系数; BEF 为蓄积量与生物量的转换因子; B_0 为实测林分生物量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为评估林分蓄积量, m^3 |
| 贴现率 | $t = (Dr + Lr)/2$ $d = (1 + t_{n+1}) (1 + t_{n+2}) \dots (1 + t_m)$ | t 为存贷款均衡利率, $\%$; d 为贴现率; Dr 为银行平均存款利率, $\%$; Lr 为银行平均贷款利率, $\%$; n 为价格参数可获得年份; m 为评估年份 |

3 结果与分析

3.1 森林生态系统净化大气环境功能的水平分布

从表2可以看出,宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统产生负离子量为 1.426×10^{23} 个 \cdot 年 $^{-1}$,产生负离子量相对较多,能够显著地提升宁夏贺兰山自然保护区的负离子含量,为人们提供较多的无形洁净资源。宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统滞纳 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 量分别为 361.27 和 $77.44 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,滞纳细颗粒物作用显著,这对于改善宁夏贺兰山的大气状况,提供更多清洁的空气具有重要的意义。可以



图1 宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能监测站点分布

Fig.1 Distribution of forest ecosystem service function of air quality purifying monitoring sites in Helanshan Nature Reserve Region of Ningxia

看出,宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能显著,对于保护区乃至周边的银川市等的空气质量改善有着重要的作用,可为人们提供更多清洁空气。

在宁夏贺兰山自然保护区5个保护管理站森林生态系统净化大气环境功能物质质量中,以大水沟保护管理站为最大,以红果子保护管理站为最小,并呈现出大水沟>马莲口>苏峪口>石嘴山>红果子的变化规律。5个保护管理站森林生态系统净化大气环境功能价值量水平分布的空间异质性较强(图2),以中部的净化大气环境价值量为最大,南部次之,北部最小,并呈现出大水沟>马莲口>苏峪口>石嘴山>红果子的变化规律。大水沟保护管理站森林生态系统净化大气环境功能的物质质量和价值量都最大。

表2 5个保护管理站森林净化大气环境功能物质质量评估
Table 2 Air quality purifying amount of five management stations

| 生态服务功能 | 红果子 | 石嘴山 | 大水沟 | 苏峪口 | 马莲口 | 合计 |
|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 负离子量(10^{22} 个 \cdot a $^{-1}$) | 0.3 | 0.74 | 5.79 | 2.95 | 4.84 | 14.62 |
| 吸附二氧化硫($t\cdot$ a $^{-1}$) | 142.3 | 383 | 3036.5 | 1549.7 | 2341.2 | 7452.7 |
| 吸附氟化物($t\cdot$ a $^{-1}$) | 5.9 | 13.3 | 105 | 54.6 | 81 | 259.8 |
| 吸附氮氧化物($t\cdot$ a $^{-1}$) | 9 | 21.9 | 64.3 | 24.1 | 48.7 | 168 |
| 滞尘量(万 $t\cdot$ a $^{-1}$) | 1.51 | 3.79 | 19.83 | 9.29 | 15 | 49.42 |
| 滞纳PM ₁₀ (($t\cdot$ a $^{-1}$) | 16.9 | 39.27 | 139.66 | 57.93 | 107.51 | 361.27 |
| 滞纳PM _{2.5} (($t\cdot$ a $^{-1}$) | 5.48 | 12.49 | 29.01 | 9.3 | 21.16 | 77.44 |

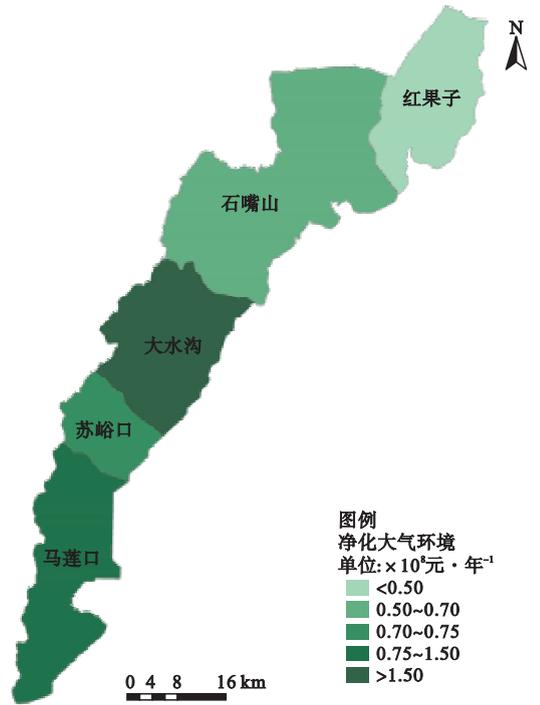


图2 5个保护管理站森林生态系统净化大气环境功能价值量分布

Fig.2 Distribution of air quality purifying function values of five management stations

3.2 不同优势树种组森林生态系统净化大气环境功能

根据《宁夏贺兰山自然保护区森林资源》,将宁夏贺兰山自然保护区的林分类型归为11个优势树种(组)。依据宁夏贺兰山国家级自然保护区及周边的3个森林生态站和6个辅助观测站点的长期监测数据,得到不同优势树种组单位面积产生负离子,吸收二氧化硫、氟化物和氮氧化物,滞尘、滞纳PM₁₀和PM_{2.5}的量,再结合不同优势树种组的面积,进而可以求出不同优势树种组净化大气环境功能的物质质量,详见表3。从表3可以看出,不同优势树种组净化大气环境的物质质量虽然在个别评估指标中出现波动差异,但总体以云杉林和灌木林为最多,这主要与两个林分的面积及树种特性有关。

在不同优势树种组净化大气环境价值量的垂直分布格局中(图3),以2400~3000 m段为最高,3000~3500 m段次之,1800~2400 m段为最小,阴坡多于阳坡,这主要是因为海拔2400~3000 m段的温度和降水因子相对较好,能够为植被提供更好的生长环境。以灌木林和云杉林的价值量为最大的垂直分布格局,并呈现出灌木林>云杉林>针阔混交林>灰榆林>油松林>山杨林>经济林>其他硬阔林>柳树

表3 不同优势树种组森林净化大气环境物质质量评估

Table 3 Air quality purifying amount of ecosystem services of different forest types

| 生态服务功能 | 云杉林 | 油松林 | 杜松林 | 灰榆林 | 其他硬阔林 | 山杨林 | 新疆杨林 | 柳树林 | 针阔混交林 | 经济林 | 灌木林 | 合计 |
|---|---------|---------|------|--------|-------|------|-------|------|--------|------|--------|--------|
| 负离子量(10^{21} 个 \cdot a $^{-1}$) | 72.44 | 18.48 | 0.07 | 7.7 | 5.18 | 0.14 | <0.01 | 0.14 | 25.68 | 0.08 | 16.27 | 146.18 |
| 吸附二氧化硫($t\cdot a^{-1}$) | 4606.65 | 1095.64 | 6.36 | 452.57 | 0.05 | 1.91 | 80.83 | 2.02 | 405.13 | 2.44 | 799.1 | 7452.7 |
| 吸附氟化物($t\cdot a^{-1}$) | 148.6 | 42.97 | 0.13 | 1.92 | <0.01 | 0.11 | 0.46 | 0.17 | 21.25 | 0.02 | 44.17 | 259.8 |
| 吸附氮氧化物($t\cdot a^{-1}$) | 44.58 | 12.89 | 0.07 | 23.09 | <0.01 | 0.13 | 5.45 | 0.13 | 27.42 | 0.16 | 54.08 | 168 |
| 滞尘量(万 $t\cdot a^{-1}$) | 23.76 | 6.87 | 0.04 | 3.89 | <0.01 | 0.02 | 0.92 | 0.03 | 4.77 | 0.02 | 9.1 | 49.42 |
| 滞纳PM ₁₀ ($t\cdot a^{-1}$) | 122.77 | 59.27 | 0.33 | 28.1 | <0.01 | 0.16 | 6 | 0.18 | 32.64 | 0.21 | 111.61 | 361.27 |
| 滞纳PM _{2.5} ($t\cdot a^{-1}$) | 36.18 | 9.18 | 0.13 | 3.37 | <0.01 | 0.03 | 1.4 | 0.04 | 8.84 | 0.05 | 18.22 | 77.44 |

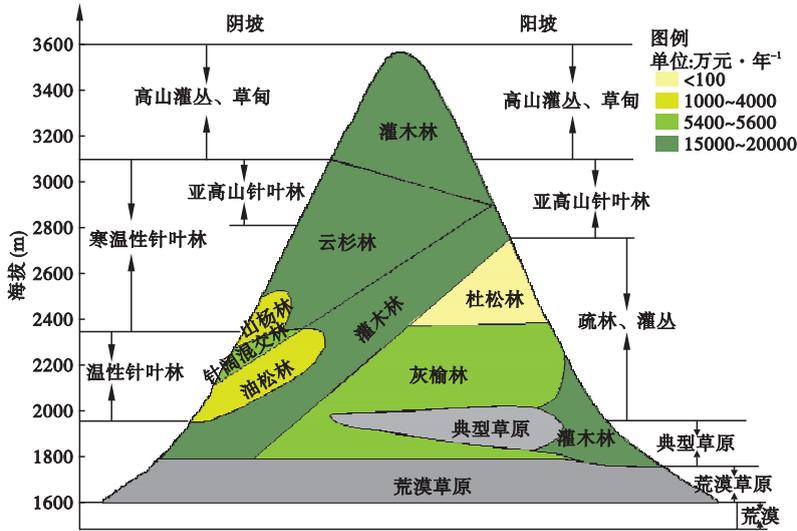


图3 不同优势树种组森林生态系统净化大气环境价值量的垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of air quality purifying function value of different forest types

林>杜松林>新疆杨林的变化规律,这是因为灌木林和云杉林分布范围广泛,面积较大,从而使得这两个树种组净化大气环境功能最高。

4 讨论

4.1 宁夏贺兰山森林生态系统净化大气环境功能水平分布差异性

在宁夏贺兰山5个保护管理站中,大水沟保护管理站净化大气环境功能不论是物质质量还是价值量均最大,并呈现出大水沟>马莲口>苏峪口>石嘴山>红果子的变化规律。这是因为大水沟保护管理站降水资源相对丰富,森林面积相对较大,面积因子是影响森林净化大气环境功能最重要的要素之一,这与牛香等(2012)的基于分布式测算方法评估福建省森林生态系统服务功能,周鸿升等(2014)的退耕还林工程重点监测省份生态效益评估和刘胜涛等(2017)评估泰山森林生态系统服务功能及其价值得出的森林资源面积是决定评估结果的最主要的因

子相一致。这主要是因为森林资源面积是评估的基础和基石,一切的生态效益都是建立在森林资源面积之上,从而使得森林的资源面积在生态效益评估中影响最大。

在宁夏贺兰山森林生态系统净化大气环境功能水平分布中,以中部最大,南部次之,北部最小。这是因为根据宁夏贺兰山自然地理特征,通常分为北、中、南3段,大武口沟以北为北段,大武口沟至三关口为中段,三关口以南为南端。北段海拔一般不超过2000m,山势缓和,气候干燥,植物种类和植被类型较贫乏;中段海拔最高,一般为2000~3500m左右,山岩陡峭,地形险峻,山势雄伟,自然条件复杂,植物种类丰富,类型多样;南段山地海拔又渐趋平缓,气候干旱,植物种类减少,植被覆盖率较低(Liu *et al.*, 2010)。大水沟保护管理站位于宁夏贺兰山自然保护区的中部,山体海拔相对较高,3000m以上的山体多分布于此,降水量相对丰富,年均降水量多在400mm以上。而降水又是西北干旱半干旱区

域森林植被分布的驱动因子,降水相对较多,森林植被生长相对较好,树种分布相对均匀,森林类型多样。其次,大水沟保护管理站山体海拔较高,能够有效降低风速,减弱风携带沙尘的能力,使部分沙物质沉降。更重要的是由于山体上森林的存在,形成一道天然的防护墙,在降低风速外的同时,森林的枝叶还能够滞纳空气中的沙尘,将沙物质拦挡在林内;同时,森林分泌的黏着物质能够直接捕获沙尘,减少空气中沙尘的含量;再者,植物叶片在进行光合作用时,叶片气孔打开,在吸收二氧化碳进行光合作用的同时,会部分地吸收空气中的病菌、有毒物质等,起到净化大气环境的作用。正是由于大水沟保护管理站的地形因素,决定了其森林植被面积和分布,再加上森林植被对大气环境的净化能力较强,从而使得大水沟保护管理站的净化大气环境功能最大。

4.2 宁夏贺兰山森林生态系统净化大气环境功能垂直带状分布

不同优势树种组净化大气环境价值以灌木林和云杉林为最大,这与丛日征等(2017)对陕西省森林生态系统净化大气环境功能价值评估的结果相一致。这是因为云杉作为我国特有树种之一,耐干燥及寒冷的环境条件,分布范围较广,面积较大,占到宁夏贺兰山自然保护区森林总面积的 26.55%;再加上云杉林属于针叶树种,叶比表面积大,小枝有疏生或密生的短绒毛,可以有效地滞纳空气中的颗粒性物质,能够分泌树脂粘液,可以吸滞灰尘、微生物和病菌,减少大气中有毒有害物质等特点(牛香等, 2017),能够较好地起到净化大气环境的作用,从而使得云杉林净化大气环境功能较强。灌木林净化大气环境功能价值较大,最主要的原因是其面积最大,占到了宁夏贺兰山自然保护区森林总面积的近 1/3,达到 32.50%。大面积的灌木林覆盖在地表,有效降低了近地表的风速,降低风的携沙能力,增大沙尘的起沙风速,使得更多的沙物质不容易飞起,达到风起而沙不起的效果(周鸿升等, 2014),从而有效地减少空气中的沙尘及有害物质,较好地实现了净化大气环境的功能。

不同的优势树种组净化大气环境功能呈现出 2400~3000 m 段最大,3000~3500 m 段次之,1800~2400 m 段最小,阴坡多于阳坡的阶梯式分布规律。这主要是因为海拔 2400~3000 m 段相对于其他两个区段水热条件相对较好,能够达到植被生长的最适条件。温度随着海拔的升高而降低,海拔每升高

1000 m,温度平均下降 6 ℃;但水汽随着山体海拔的升高而富集增加,山体海拔高有利于水汽的凝结,易形成有效水分。山体海拔 1800~2400 m 段山体低于 2400~3000 m 段,此区段的降水因子是影响植被分布的限制因子,有效水分少,森林植被分布不如 2400~3000 m 段丰富;而山体海拔 3000~3500 m 段,由于山体海拔过高,温度降低,温度因子成为森林植被分布的限制因子。因此,山体海拔在 2400~3000 m 段的森林植被多于 1800~2400 和 3000~3500 m 段,从而使得此区段森林净化大气环境功能较强,并呈现出垂直梯度分布格局。

5 结 论

本文从提供负离子、吸收二氧化硫、吸收氟化物、吸收氮氧化物、滞尘、滞纳 PM₁₀和滞纳 PM_{2.5}等 7 个方面对宁夏贺兰山自然保护区森林净化大气环境功能进行物质和价值评估,主要结论如下:

(1)宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能显著,在水平方向分布中,物质和价值量均呈现出中部高,南部次之,北部最小的变化规律;以大水沟保护管理站净化大气环境功能最大,以红果子保护管理站最小,并呈现出大水沟>马莲口>苏峪口>石嘴山>红果子的水平分布规律。

(2)宁夏贺兰山自然保护区森林生态系统净化大气环境功能在垂直方向上呈现出 2400~3000 m 段高于 3000~3500 和 1800~2400 m 段,山体阴坡高于阳坡的分布规律。具体到不同的树种组中,表现为以灌木林净化大气环境功能最高,其次为云杉林,以杜松林和新疆杨林为最低;并呈现出灌木林>云杉林>针阔混交林>灰榆林>油松林>山杨林>经济林>其他硬阔林>柳树林>杜松林>新疆杨林的变化规律。

参考文献

- 丛日征,王兵,牛香,等. 2017. 陕西省森林生态系统净化大气环境功能价值评估. 西北林学院学报, 32(5): 75-82.
- 国家林业局. 2015. 退耕还林工程生态效益监测国家报告. 北京:中国林业出版社.
- 国家林业局. 2008. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京:中国标准出版社.
- 何海军,温家声,张锦炜,等. 2015. 海南红树林湿地生态系统服务价值评估. 生态经济, 31(4): 145-149.
- 李育才. 2009. 中国北方退耕还林工程建设效益评价研究. 北京:蓝天出版社.

- 刘胜涛, 高鹏, 刘潘伟, 等. 2017. 泰山森林生态系统服务功能及其价值评估. *生态学报*, **37**(10): 3302-3310.
- 马志波, 孙伟, 黄清麟. 2014. 森林生态系统服务的价值评估和补偿: 概念、原则和指标. *中国农业大学学报*, **19**(5): 263-268.
- 牛香. 2012. 森林生态效益分布式测算及其定量化补偿研究——以广东和辽宁省为例(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.
- 牛香, 王兵. 2012. 基于分布式测算方法的福建省森林生态系统服务功能评估. *中国水土保持科学*, **10**(2): 36-43.
- 牛香, 薛恩东, 王兵, 等. 2017. 森林治污减霾功能研究. 北京: 科学出版社.
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 1999. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, **19**(5): 607-613.
- 师寅雄. 2016. 长江、黄河中上游地区退耕还林工程生态效益特征及价值化研究(博士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
- 孙清琳, 李延森, 郭继凯, 等. 2015. 云和县森林生态系统水源涵养功能评估. *北京大学学报: 自然科学版*, **51**(5): 888-896.
- 宋庆丰, 牛香, 王兵. 2015. 基于大数据的森林生态系统服务功能评估进展. *生态学杂志*, **34**(10): 2914-2921.
- 修珍珍, 王斌, 杨校生, 等. 2015. 庙山坞自然保护区森林生态系统服务功能评估. *南京林业大学学报: 自然科学版*, **39**(4): 81-87.
- 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 2005. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, **25**(8): 2096-2102.
- 朱颖, 吕洁华. 2015. 国内森林生态系统服务价值评估方法与指标研究综述. *林业经济*, (8): 74-84.
- 周鸿升, 敖安强, 李保玉, 等. 2014. 退耕还林工程重点监测省份生态效益评估. *林业经济*, (5): 37-41.
- 中国森林资源核算研究项目组. 2015. 生态文明制度构建中的中国森林资源核算研究. 北京: 中国林业出版社.
- Camacho-Valdaz V, Ruiz-Luna A, Ghermandi A, *et al.* 2014. Effects of land use changes on the ecosystem service values of coastal wetlands. *Environmental Management*, **54**: 852-864.
- Goldsmith KA, Granek EF, Lubitow A. 2015. Information needs assessment for coastal and marine management and policy: Ecosystem services under changing climatic, land use, and demographic conditions. *Environmental Management*, **56**: 1502-1513.
- Jia HC, Pan DH, Zhang WC. 2015. Health assessment of wetland ecosystems in the Heilongjiang River Basin, China. *Wetlands*, **35**: 1185-1200.
- Liu BJ, Feng SY, Ji JF, *et al.* 2017. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin: Results of deep seismic reflection profiling. *Science China Earth Sciences*, **60**: 589-601.
- Liu JH, Zhang PZ, Zheng DW, *et al.* 2010. Pattern and timing of late Cenozoic rapid exhumation and uplift of the Helan Mountain, China. *Science China Earth Sciences*, **53**: 345-355.
- Liu XH, Lu XG, Jiang M, *et al.* 2009. Value estimation of greenhouse gases exchange in wetland ecosystem of Sanjiang Plain, China. *Chinese Geographical Science*, **19**: 55-61.
- Melvin AM, Mack MC, Johnstone JF, *et al.* 2015. Differences in ecosystem carbon distribution and nutrient cycling linked to forest tree species composition in a mid-successional boreal forest. *Ecosystems*, **18**: 1472-1488.
- Pang Y, Zhang BP, Zhao F, *et al.* 2013. Omni-directional distribution patterns of montane coniferous forest in the Helan Mountains of China. *Journal of Mountain Science*, **10**: 724-733.
- Ray D, Bathgate S, Moseley D, *et al.* 2015. Comparing the provision of ecosystem services in plantation forests under alternative climate change adaptation management options in Wales. *Regional Environmental Change*, **15**: 1501-1513.
- Winter JM, Pal JS, Eltahir A. 2009. Coupling of integrated biosphere simulator to regional climate model version 3. *Journal of Climate*, **22**: 2743-2757.

作者简介 刘胜涛, 1989年生, 男, 博士研究生, 主要从事森林生态服务功能评估研究。E-mail: lst295619401@163.com
责任编辑 张敏
