

青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价

朱 柱, 杨海龙, 黄 乾, 赵嘉玮

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 青海高寒黄土区水源涵养林的健康状况直接影响到该地区退耕还林(草)工程生态效益的发挥。以青海省大通回族土族自治县塔尔沟林场的青海云杉 *Picea crassifolia* 林, 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 林, 白桦 *Betula platyphylla* 林, 青海云杉-华北落叶松混交林以及青海云杉-白桦混交林等 5 种典型水源涵养林为研究对象, 采用森林健康相关理论和专家咨询法, 构建森林健康评价指标体系, 利用熵权法确定评价指标权重, 最后根据综合指数法进行水源涵养林健康指数计算并分析比较。结果表明: 青海云杉-白桦混交林为优质林, 白桦林为健康林, 青海云杉林和青海云杉-落叶松混交林为亚健康林, 华北落叶松林为不健康林。健康评价指标体系中, 森林火险等级、叶面积指数和病虫害程度等 3 项指标的权重较大, 依次为 0.242 3, 0.128 8 和 0.122 2, 是影响森林健康的重要因子。总体上看, 混交林健康程度优于纯林, 阔叶林健康程度优于针叶林, 青海云杉-白桦混交林是相对较好的水源涵养林树种配置模式。表 7 参 27

关键词: 水土保持学; 青海高寒黄土区; 典型水源涵养林; 指标体系; 熵权法; 健康指数

中图分类号: S714.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)06-1166-08

Health evaluation of typical water conservation forests in the alpine loess area of Qinghai

ZHU Zhu, YANG Hailong, HUANG Qian, ZHAO Jiawei

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The ecological effect of the Grain for Green Project in the alpine loess area of Qinghai, affected the health status of water conservation forests. However, there is a lack of scientific evaluation method in this area present. This study was aimed to identify the key environmental factors affected the forest and find suitable vegetation types by making health evaluation on water conservation forests. Five typical water conservation forests, including *Picea crassifolia*, *Larix principis-rupprechtii*, *Betula platyphylla*, *Picea crassifolia-Larix principis-rupprechtii*, and *Picea crassifolia-Betula platyphylla*, in the Taergou Forest Farm of Datong County were taken as research objects. Three standard samples (20 m × 20 m) were selected in every stand for plant (trees, shrubs and herbs) investigation and soil properties measurement. The theory of forest health, combined with expert consultation were used along with the entropy weight method to construct the forest health evaluation index system. The health status of these five forests were evaluated and analyzed by the integrated health index. Results showed that *P. crassifolia-B. platyphylla* was a high quality forest, *B. platyphylla* was a healthy forest, *P. crassifolia* and *P. crassifolia-L. principis-rupprechtii* were fairly healthy forests, and *L. principis-rupprechtii* was an unhealthy forest. In the health evaluation index system, the three most important indexes, or critical factors affecting forest health, and their weights, were forest fire risk rating (0.242 3), leaf area index (0.128 8), and degree of pests and disease (0.122 2). Generally, the health of a mixed forest was better than a pure forest, a broadleaf forest was better than a coniferous forest, and the *P. crassifolia-B. platyphylla* forest was a rela-

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2019-03-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0504600)

作者简介: 朱柱, 从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: zhuzhubjfu@163.com。通信作者: 杨海龙, 副教授, 从事流域管理、森林水文研究。E-mail: yang_hlong@163.com

tively good tree species allocation model for a water conservation forest. [Ch, 7 tab. 27 ref.]

Key words: water and soil conservation; the alpine loess area of Qinghai; typical water conservation forest; index system; entropy weight method; health index

森林健康的相关研究开始于 20 世纪 60 年代,其理念是西方国家针对人工林林分结构单一,森林病虫害防治能力差,水土保持能力弱等提出的^[1]。随着研究的不断深入,人们对于森林健康的认识也由林分本身属性转移到了森林生态系统上,而森林健康的监测和评价是了解森林健康状况的重要手段^[2]。及时了解森林健康状况,对于合理经营森林,提高森林生态系统服务功能,实现人与自然和谐相处等有着重要意义。截至目前,中国学者对森林健康评价进行了诸多研究,并在评价指标的选取^[3-5]、评价方法的运用^[6-8]以及评价尺度^[9-10]和健康划分标准上都呈现多元化,但对于青海高寒黄土区的森林健康评价研究还相对较少。因此,及时监测和了解该地区人工植被的生长状况对提高退耕还林(草)工程等生态恢复工程的生态效益有着重大意义。本研究选择青海省大通回族土族自治县退耕还林第 2 阶段(20 世纪 80 年代至 90 年代末)营造的人工林中的 5 种典型水源涵养林为研究对象,通过构建森林健康评价指标体系,计算 5 种林分的健康指数 I_h (health index)并进行分析和比较,以期为该地区人工林植被结构调整和多种服务功能综合提升研究提供理论指导和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

有学者^[11-12]认为:高寒黄土区在中国自然规划上属于独立的大区,特点是海拔高、辐射强、气候寒冷,其自然植被主要受非地带性因素的影响,存在生长速度缓慢,发育不良以及生态效益低下等诸多问题。该区主要包括青海省的西宁、门源、湟中和贵德等县市^[13]。本研究试验地位于青海省西宁市大通回族土族自治县(36°43'~37°23'N, 100°51'~101°56'E),地处黄土高原与祁连山地的过渡地带,海拔为 2 280~4 622 m,属高原大陆性气候。该地区年平均降水量为 523.3 mm,年平均气温为 4.9 °C,年平均蒸发量为 1 762.8 mm,年内无霜期为 61.0~133.0 d,年湿润指数为 0.56~1.32,平均风速 2 m·s⁻¹;土壤主要为山地棕褐土、栗钙土和黑钙土。本试验地在大通回族土族自治县塔尔沟林场,现有植被主要为林龄为 25~35 年生的人工林,主要乔木树种有青海云杉 *Picea crassifolia*,青杨 *Populus cathayana*,白桦 *Betula platyphylla* 和华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 等;灌木有山杏 *Armeniaca sibirica*,银露梅 *Potentilla glabra*,柠条 *Caragana koshinskii*,沙棘 *Hippophae rhamnoides* 等;草本有草木犀 *Melilotus officinalis*,艾蒿 *Artemisia argyi*,蒲公英 *Taraxacum mongolicum*,飞廉 *Carduus nutans* 和火绒草 *Leontopodium leontopodioides* 等。

1.2 样地设置

2018 年 6~8 月,在青海省大通回族土族自治县塔尔沟林场进行采样和调查。在全面实地踏查的基础上,选取当地 5 种典型水源涵养林,青海云杉林、白桦林、华北落叶松林、青海云杉-华北落叶松混交林和青海云杉-白桦混交林。每种水源涵养林选择 3 块 20 m × 20 m 的标准样地,共布设 15 块标准样地。标准样地的选择满足在地质地貌、土壤、坡度和坡向等方面具有代表性和一致性,同时所选林分的密度为目前该地区立地条件下各林分最常见的经营密度。在各标准样地内进行每木检尺,记录树种、林龄、树高、胸径、冠幅、株数等。在乔木样方内部 4 个角及中心位置共设置 5 个 5 m × 5 m 灌木样方,记录灌木种类、高度和盖度等。在每个灌木样方中心取 1 个 1 m × 1 m 草本样方,记录草本种类、株数、高度和盖度等。调查的 15 块标准样地的基本情况见表 1。

2 林分健康评价指标体系的构建

2.1 评价指标选取

评价指标的选择是森林健康评价的关键,一套科学、合理、适用性强的森林健康评价指标体系直接影响着森林健康评价结果的准确性。高志亮等^[14]采用定性和定量相结合的方法,构建包括完整性指标、稳定性指标和可持续性指标共 3 类 7 个指标,对北京松山自然保护区森林进行了健康评价研究。鲁绍伟

表1 标准样地基本情况

Table 1 Basic information of standard sample plots

植被类型	样地编号	样方面积/m ²	海拔/m	坡向	坡度/(°)	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/(m×m) 东西×南北	郁闭度
青海云杉	Pc-1	400	2 960	半阴坡	15	10.96	11.71	2.89×2.98	0.66
	Pc-2	400	2 949	半阴坡	21	9.08	10.87	2.94×2.47	0.62
	Pc-3	400	2 887	阴坡	17	11.35	12.03	3.02×2.86	0.60
华北落叶松	Lp-1	400	2 840	半阴坡	14	11.48	12.83	2.80×3.17	0.73
	Lp-2	400	2 910	阴坡	13	11.81	13.07	3.05×3.01	0.76
	Lp-3	400	2 887	半阴坡	11	11.63	13.01	3.02×2.87	0.81
白桦	Bp-1	400	2 944	半阴坡	18	9.47	11.29	3.39×5.18	0.75
	Bp-2	400	2 944	阴坡	18	10.53	11.78	3.25×3.96	0.71
	Bp-3	400	2 910	阳坡	20	9.85	11.43	3.47×4.13	0.69
青海云杉-华北落叶松	Pc/Lp-1	400	2 877	阴坡	19	6.12/11.62	6.38/12.65	2.03×2.30/2.99×3.19	0.61
	Pc/Lp-2	400	2 956	半阴坡	20	9.26/11.66	10.37/12.25	2.69×2.43/2.86×2.62	0.66
	Pc/Lp-3	400	2 860	阴坡	18	7.28/10.87	7.36/11.75	2.34×2.37/2.47×2.83	0.62
青海云杉-白桦	Pc/Bp-1	400	2 955	阴坡	18	7.30/7.15	8.91/11.86	2.62×3.12/3.08×3.44	0.73
	Pc/Bp-2	400	2 939	阴坡	21	4.37/10.38	5.81/14.21	1.91×2.15/2.93×3.84	0.79
	Pc/Bp-3	400	2 915	阴坡	20	6.37/8.56	8.95/12.03	2.65×3.07/2.86×3.54	0.75

说明: Pc, Lp, Bp 分别代表青海云杉、华北落叶松和白桦

等^[15]运用复合结构功能指标法对八达岭林场 121 个小班进行健康评价并划分 4 个等级。汪加魏等^[16]提出水源涵养林健康评价指标体系的 7 个原则, 并利用分层评价的指标分值法对北京市八达岭林场景观型水源涵养林进行健康评价。由于在青海高寒黄土区森林健康方面的研究还相对较少, 因此本研究在参考前人关于森林健康评价或水源涵养林健康评价指标筛选的研究成果基础上, 结合森林健康相关理论、研究区水源涵养林实际情况和专家咨询法, 在满足系统性、科学性和可操作性等指标选取原则的条件下, 筛选一套适合本研究区水源涵养林健康评价的指标体系, 主要包括完整性指标、稳定性指标和可持续性指标 3 个方面共 11 项指标(表 2)。

表2 森林健康评价指标体系

Table 2 Assessment index system of forest health

一级指标	二级指标
完整性指标	乔木层密度 C_1 , 林分郁闭度 C_2 , 草本层 Shannon 指数 C_3
稳定性指标	枯立木比例 C_4 , 病虫害程度 C_5 , 火险等级 C_6
可持续性指标	土壤厚度 C_7 (cm), 土壤 0~60 cm 平均最大持水量 C_8 (t·hm ⁻²), 凋落物厚度 C_9 (cm), 凋落物最大持水率 C_{10} (%), 叶面积指数 C_{11}

2.2 评价指标的调查和计算

评价指标又可细分为定量指标和定性指标。定量指标数据可通过外业调查结合内业实验获得, 定性指标则需要参考《森林资源规划设计调查技术规程》等标准转化为定量数值。

2.2.1 定量指标调查与计算 ①乔木密度: 单位面积上乔木层树木株数。②叶面积指数和郁闭度: 利用 WinSCANOPY 2006 软件设备的冠层分析仪在多云或者晴朗天气的 8:00–10:00, 在离地面 1.3 m 处对乔木冠层进行拍照, 每个样地选择 3 个点, 每个点拍 5~10 张照片。内业分析时去掉曝光过度的照片, 获得标准样地的冠层叶面积指数和冠层开阔度。其中: 林分郁闭度=(1-冠层开阔度)×100%。③草本层

Shannon-Wiener 指数^[17]: $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ 。其中: $P_i = N_i/N$, N 为样地草本重要值总和, N_i 为样方中第 i 种草本的重要值, P_i 为重要值比例(相对重要值), S 为样地的草本种数。④枯立木比例: 标准样地内乔木层枯立木株数与乔木总株数之比。⑤土壤厚度: 在每个标准样地内沿着等高线的方向, 等间隔设置 10

个测点, 利用特制的一根长 110 m, 直径 10 mm 的钢钎敲入土壤中, 以钢钎入土深度作为该测点的土壤厚度值, 以 10 个测点土壤厚度的平均值作为该标准样地的土壤厚度值^[18]。⑥土壤 0~60 cm 平均最大持水量: 在每种水源涵养林的标准样地中心位置, 挖 3 个土壤剖面, 用环刀在 0~20, 20~40 和 40~60 cm 处分层取样, 每层 3 次重复, 带回实验室采用环刀法^[19]测量土壤饱和持水量和总孔隙度, 并用公式(1)和(2)计算土壤总孔隙度和每层最大持水量, 最后对每个样地的 0~60 cm 的土壤最大持水量计算平均值。

$$P_t = (W_2 - W_1) / (W_1 - W_0) \times 100\%; \quad (1)$$

$$W_t = 10\,000 P_t h. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: P_t 为土壤总孔隙度, W_t 为土壤最大持水量($t \cdot hm^{-2}$), W_0 为空环刀质量(g), W_1 为土样和环刀烘干质量(g), W_2 为土样和环刀完全浸水 12 h 总质量(g), h 为每层土壤厚度(m)。⑦凋落物厚度和凋落物最大持水率: 在每个标准样地内沿对角线设置 3 个 25 cm × 25 cm 的小样方, 在小样方内调查凋落物的厚度并取样, 然后在室内测定凋落物的最大持水率。首先, 将取回的凋落物样品称量(鲜质量 w_0), 然后放置于烘箱中, 在 80 °C 条件下烘干至恒量后再次称量(干质量 w_1), 最后将烘干的凋落物样品装入尼龙袋中后放水中完全浸水 24 h 后取出, 空干后再次称量(饱和湿质量 w_2)。按公式(3)计算凋落物最大持水率(C)。

$$C = (w_2 - w_1) / w_1 \times 100\%. \quad (3)$$

2.2.2 定性指标的调查和转化 根据研究区实际情况和相关标准将定性指标分为 4 级, 分值分别为 I 级 4 分, II 级 3 分, III 级 2 分, IV 级 1 分(表 3)。

表 3 森林健康定性指标分级标准

Table 3 Standards of forest health indicator classification

定性指标	等级与分值			
	I 级(4 分)	II 级(3 分)	III 级(2 分)	IV 级(1 分)
病虫害程度	无受灾立木	受灾立木 < 20%	受灾立木 20%~50%	受灾立木 > 50%
火险等级	弱火险级, 不易发生火灾	低火险级, 注意林区用火安全	中火险级, 控制林区用火	高火险级, 严禁林区用火

2.2.3 指标的标准化 由于评价指标来自不同的方面, 各指标的量纲不统一, 而且不同指标之间数据相差较大, 因此需要对评价指标进行标准化处理。本研究采用极值法^[20]对原始数据进行标准化处理。正相关指标的标准化公式: $S' = (S - S_{\min}) / (S_{\max} - S_{\min})$, 负相关指标的标准化公式: $S' = (S_{\max} - S) / (S_{\max} - S_{\min})$ 。其中: S' 为指标标准化值, S 为指标实际值, $S_{\max}$ 为该指标在所有标准样地中的最大值, $S_{\min}$ 为该指标在所有标准样地中的最小值。所有数据进行标准化处理后处于 [0, 1]。本研究指标体系中, 枯立木比例为负相关指标, 其他指标均为正相关指标(病虫害程度和火险程度 2 项指标, 等级越低, 赋值越高, 量化数值为正相关)。森林健康评价指标标准化值见表 4。

2.3 评价指标权重确定

评价指标的权重直接影响着森林健康评价的结果, 科学计算评价指标权重是进行森林健康评价的关键。本研究采用熵权法^[20]估算各评价指标的权重, 其本质是在综合考虑各项指标实测数据传递给决策者的信息量大小来确定指标权重。指标的信息熵(H_j)越小则表明该项指标提供的信息量越大, 其权重(W_j)也应该越大。熵权法是一种比较客观的权重确定方法。其计算公式如下:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m). \quad (4)$$

$$\text{式(4)中: } f_{ij} = \frac{S'_{ij}}{\sum_{i=1}^n S'_{ij}}, \quad k = \frac{1}{\ln n} \quad (\text{假定 } f_{ij}=0 \text{ 时, } f_{ij} \ln f_{ij}=0).$$

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)}, \quad (j=1, \dots, m). \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: H_j 为第 j 评价指标的熵, W_j 为第 j 指标的权重(总和为 1), S'_{ij} 为第 i 样地第 j 指标的标准化值, i 为第 i 样地; j 为森林健康评价指标。

表4 森林健康评价指标标准化值

Table 4 Standardized data of forest health assessment index

样地编号	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
Pc-1	0.502 4	0.285 7	0.082 0	1.000 0	1.0	0	0.000 0	0.767 0	0.580 6	0.476 1	0.102 6
Pc-2	0.409 1	0.095 2	0.000 0	0.875 0	1.0	0	0.315 8	1.000 0	0.677 4	0.581 2	0.051 3
Pc-3	0.326 4	0.000 0	0.034 3	1.000 0	1.0	0	0.210 5	0.840 1	0.645 2	0.526 6	0.025 6
Lp-1	0.042 4	0.619 0	0.329 2	0.062 5	0.0	0	0.684 2	0.595 4	0.483 9	0.137 4	0.000 0
Lp-2	0.055 7	0.761 9	0.367 6	0.312 5	0.0	0	1.000 0	0.531 0	0.387 1	0.000 0	0.059 8
Lp-3	0.187 7	1.000 0	0.344 8	0.187 5	0.0	0	0.894 7	0.617 9	0.419 4	0.099 3	0.111 1
Bp-1	0.055 7	0.714 3	0.643 8	0.562 5	0.5	1	0.368 4	0.000 0	0.032 3	0.545 2	0.931 6
Bp-2	0.030 4	0.523 8	0.662 5	0.125 0	0.5	1	0.684 2	0.119 4	0.096 8	0.666 7	1.000 0
Bp-3	0.000 0	0.428 6	0.652 2	0.312 5	0.5	1	0.526 3	0.054 8	0.000 0	0.4967	0.820 5
Pc/Lp-1	0.942 4	0.047 6	0.432 0	0.000 0	0.5	0	1.000 0	0.850 6	0.838 7	0.589 8	0.068 4
Pc/Lp-2	1.000 0	0.285 7	0.427 8	0.437 5	0.0	0	0.526 3	0.784 9	0.741 9	0.520 6	0.145 3
Pc/Lp-3	0.967 5	0.095 2	0.456 9	0.250 0	0.0	0	0.789 5	0.810 9	0.709 7	0.437 7	0.341 9
Pc/Bp-1	0.653 1	0.619 0	0.813 1	0.500 0	0.5	1	0.631 6	0.695 8	0.967 7	0.921 8	0.598 3
Pc/Bp-2	0.735 7	0.904 8	1.000 0	0.187 5	1.0	1	0.315 8	0.628 5	1.000 0	1.000 0	0.709 4
Pc/Bp-3	0.665 3	0.714 3	0.884 7	0.562 5	1.0	1	0.578 9	0.678 1	0.871 0	0.824 1	0.649 6

说明: Pc, Lp, Bp 分别代表青海云杉、华北落叶松和白桦

依据公式(4)和(5),对经标准化处理的评价指标进行计算,得出5种典型水源涵养林健康评价指标的熵(H_j)和权重(W_j)见表5。

表5 森林健康评价指标的熵及其权重

Table 5 Entropy and weight of forest health assessment indicators

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
熵	0.853 6	0.899 6	0.912 7	0.893 0	0.829 4	0.661 6	0.943 5	0.934 2	0.921 3	0.934 5	0.820 2
权重	0.104 8	0.071 9	0.062 5	0.076 6	0.122 2	0.242 3	0.040 5	0.047 1	0.056 4	0.046 9	0.128 8

2.4 评价模型

森林健康评价的方法有很多,诸如健康距离法、模糊综合评判法、综合指数法以及人工神经网络法等。每种方法都有其优缺点及适用范围,在对森林健康评价时应根据研究者的目的合理选择评价方法和模型。本研究对5种配置模式的水源涵养林健康状况进行分析和比较,因此采用综合指数法来进行健康评价。综合指数法是通过将健康评价体系中各指标信息进行加权综合,是一种相对比较完善的评价方法^[21]。其评价模型如下:

$$I_{Hi} = \sum_{j=1}^{11} S'_{ij} W_j \quad (6)$$

式(6)中: I_{Hi} 为第*i*样地森林健康指数; S'_{ij} 为第*i*样地第*j*指标的标准化值; W_j 为第*j*指标的权重;*i*为第*i*样地;*j*为森林健康评价指标。

3 结果与讨论

3.1 森林健康等级划分

参考前人关于森林健康方面的研究,结合青海高寒黄土区水源涵养林实际情况,将森林健康指数分为4大类,分别对应4个健康等级:优质、健康、亚健康和不健康。具体划分标准见表6。

表6 森林健康等级划分标准

Table 6 Standards of ranks on forest health

健康等级	优质	健康	亚健康	不健康
健康指数	(0.7,1.0]	(0.5,0.7]	(0.3,0.5]	[0,0.3]

3.2 森林健康评价结果

对高寒黄土区 5 种典型水源涵养林共 15 块标准样地进行健康评价，根据公式(6)计算出每块标准样地的健康指数，并划分出标准样地的健康等级。结果见表 7。5 种水源涵养林的健康指数表明：青海云杉-白桦混交林为优质林，白桦林为健康林，青海云杉林和青海云杉-华北落叶松混交林为亚健康林，华北落叶松林为不健康林。水源涵养林健康指数从大到小总体表现为针阔混交林、阔叶林、针叶林。

表 7 森林健康指数与等级

Table 7 Forest health index and grade					
植被类型	健康指数	健康等级	植被类型	健康指数	健康等级
青海云杉 Pc-1	0.382	亚健康	青海云杉-落叶松 Pc/Lp-1	0.355	亚健康
青海云杉 Pc-2	0.371	亚健康	青海云杉-落叶松 Pc/Lp-2	0.329	亚健康
青海云杉 Pc-3	0.348	亚健康	青海云杉-落叶松 Pc/Lp-3	0.331	亚健康
华北落叶松 Lp-1	0.164	不健康	青海云杉-白桦 Pc/Bp-1	0.739	优质
华北落叶松 Lp-2	0.203	不健康	青海云杉-白桦 Pc/Bp-2	0.821	优质
华北落叶松 Lp-3	0.235	不健康	青海云杉-白桦 Pc/Bp-3	0.811	优质
白桦 Bp1	0.606	健康			
白桦 Bp2	0.594	健康			
白桦 Bp3	0.552	健康			

林下植被的发育对水源涵养林发挥其功效起着重要作用^[22]。本研究表明：5 种水源涵养林的林下草本 Shannon 指数变化趋势与王伟伟等^[23]研究基本一致，从小到大表现为针叶林、阔叶林、针阔混交林，这与针叶林枝繁叶茂、林下光照和降水较少等原因有关^[24]。其次，水源涵养林健康评价应注重其生态功能的发挥^[16]，健康评价指标中土壤 0~60 cm 平均最大持水率、凋落物厚度及凋落物最大持水率 3 项指标能在一定程度上反映其水源涵养能力。青海云杉-白桦混交林的凋落物降解速度远小于白桦林，其凋落物厚度和凋落物最大持水率均大于针叶林和阔叶纯林，这与刘凯等^[25]研究一致。沈剑波等^[26]在对国内外关于森林健康评价指标筛选的文献统计中发现，森林病虫害和森林火险等级出现的次数均排在前 6 位。本研究利用熵权法计算指标权重得出火险等级和病虫害程度的权重值分别为 0.242 3 和 0.122 2(表 5)，在 11 项评价指标中位于第 1 位和第 3 位，进一步验证了这 2 项指标是影响林分健康的重要因子。

森林的生长是一个连续的过程，其健康状况的变化也是连续的^[27]。本研究受限于森林调查数据在时间和空间上的不完整性，只是针对 5 种水源涵养林处于现阶段状况下进行初步的健康评价。因此，从人工林健康经营的角度出发，后期建立一套长期的、合理有效的森林健康监测体系是很有必要的。其次，在后续造林过程中，一方面可选择青海云杉-白桦混交模式，不仅可以改善林下植被生存环境，增加灌草层的物种多样性，还可以减少林分的病虫害；另一方面，可以在人工林幼林期加大人工抚育力度，调整林分树种组成和密度，并做好森林防火措施，使其朝着优质林的方向发展，在保证林分健康的情况下，提高其水源涵养能力。

4 结论

利用熵权法计算水源涵养林健康评价指标权重，使权重的确定更具有客观性，其中指标权重较大的有火险等级、叶面积指数和病虫害程度。这表明森林火险等级和病虫害程度是影响森林健康的重要因子。在今后人工林经营管理过程中，可通过采取严格控制林区用火安全及做好森林病虫害防治等措施有效提高森林的健康水平。

本研究发现：青海云杉-白桦混交林健康值在 5 种典型水源涵养林中最高，是一种比较好的水源涵养林配置模式，建议在后续造林过程中采用。在造林期间，还可以通过加大抚育力度，实时监测林分生长状况等措施提高人工林质量。

水源涵养林健康评价的结果具有地域性和针对性。本研究对大通县水源涵养林的合理经营有一定的理论指导意义；但对于其他地区或者其他功能的林分，森林健康评价需要重新筛选合适的评价指标。此外，水源涵养林健康评价在指标筛选和定性指标标准划分等方面，虽经过权威专家的一致评判，但仍然

具有一定的主观性。在后续研究中,应进一步筛选、判定和完善。

5 参考文献

- [1] 甘敬, 张振明, 余新晓, 等. 森林健康监测与评价研究[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(3): 177 – 180.
GAN Jing, ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, *et al.* Study on monitoring and assessment of forest health [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2006, **13**(3): 177 – 180.
- [2] 庄健荣, 张志翔. 结构-多样性指数在八达岭地区森林健康评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2008, **24**(8): 162 – 166.
ZHUANG Jianrong, ZHANG Zhixiang. Application of community structure-diversity index (CSDI) in forest health assessment in Beijing Badaling Area [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24**(8): 162 – 166.
- [3] 汪晶, 罗梅, 郑小贤. 杉木人工林健康评价研究: 以福建将乐林场为例[J]. 西北林学院学报, 2014, **29**(6): 195 – 199.
WANG Jing, LUO Mei, ZHENG Xiaoxian. Health assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantations: a case study of Jiangle Forest Farm in Fujian Province [J]. *J Northwest For Univ*, 2014, **29**(6): 195 – 199.
- [4] 严尚凯, 赵忠, 宋西德, 等. 黄土高原渭北地区油松林健康评价研究[J]. 西北林学院学报, 2010, **25**(5): 7 – 11.
YAN Shang kai, ZHAO Zhong, SONG Xide, *et al.* Health assessment of Chinese pine forest in Weibei Loess Plateau [J]. *J Northwest For Univ*, 2010, **25**(5): 7 – 11.
- [5] 张桓, 韩海荣, 康峰峰, 等. 自然保护区森林健康评价体系的构建与应用[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(1): 59 – 65.
ZHANG Huan, HAN Hairong, KANG Fengfeng, *et al.* Establishment and application of forest health assessment system for nature reserve [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(1): 59 – 65.
- [6] 张顺祥, 刘金良, 赵忠. 基于多元统计分析的永寿县刺槐人工林健康评价研究[J]. 西北林学院学报, 2016, **31**(2): 109 – 114.
ZHANG Shunxiang, LIU Jinliang, ZHAO Zhong. Health assessment on black locust plantations in Yongshou County based on multivariate statistical analysis [J]. *J Northwest For Univ*, 2016, **31**(2): 109 – 114.
- [7] 施明辉, 赵翠薇, 郭志华, 等. 基于 GIS 和改进 BP 神经网络的天然白桦林健康评价[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(4): 237 – 240.
SHI Minghui, ZHAO Cuiwei, GUO Zhihua, *et al.* Assessment on health of natural *Betula platyphylla* forest based on GIS and BP neural networks [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2011, **18**(4): 237 – 240.
- [8] 麻坤, 赵鹏祥, 季菲菲, 等. 基于植被指数的秦岭森林健康评价方法研究[J]. 西北林学院学报, 2013, **28**(6): 145 – 150.
MA Kun, ZHAO Pengxiang, JI Feifei, *et al.* Forest health assessment method in Qinling Mountains based on the vegetation indices [J]. *J Northwest For Univ*, 2013, **28**(6): 145 – 150.
- [9] 胡焕香, 余济云, 张敏, 等. 基于小班尺度的宁远河流域森林健康评价研究[J]. 西北林学院学报, 2013, **28**(2): 182 – 186.
HU Huanxiang, SHE Jiyun, ZHANG Min, *et al.* Assessment on the health of the forests in Ningyuan River Basin [J]. *J Northwest For Univ*, 2013, **28**(2): 182 – 186.
- [10] 张国桢, 甘敬, 朱建刚. 北京山区森林健康的多尺度评价[J]. 林业科学, 2011, **47**(6): 143–151.
ZHANG Guozhen, GAN Jing, ZHU Jiangang. Multi-scale health assessment of forests in mountainous regions of Beijing [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(6): 143 – 151.
- [11] 张忠孝. 青海省综合自然地理区划初探[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 1987, **12**(2): 41 – 46.
ZHANG Zhongxiao. Brief survey on the division of the comprehensive and natural geographical areas in Qinghai [J]. *J Qinghai Norm Univ Nat Sci Ed*, 1987, **12**(2): 41 – 46.
- [12] 陈静. 黄土高寒区 3 种灌木光合特性对水/盐胁迫的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
CHEN Jing. *The Response to Water Stress or Salt Stress of the Three Shrubs' Photosynthetic Characteristics in Loess Plateau Region* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [13] 张忠孝. 青海地理[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 高志亮, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京市松山自然保护区森林健康评价研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(2):

- 127 – 131.
- GAO Zhiliang, YU Xinxiao, YUE Yongjie, *et al.* Forest health assessment in Songshan Nature Reserve of Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30**(2): 127 – 131.
- [15] 鲁绍伟, 刘凤芹, 余新晓, 等. 北京市八达岭林场森林生态系统健康性评价[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(3): 79 – 82.
- LU Shaowei, LIU Fengqin, YU Xinxiao, *et al.* Health assessment of forest ecosystem in Badaling Forest Center [J]. *J Soil Water Conserv*, 2006, **20**(3): 79 – 82.
- [16] 汪加魏, 于丹丹, 尹群, 等. 北京市八达岭林场景观型水源涵养林健康评价研究[J]. 西北林学院学报, 2015, **30**(1): 233 – 239.
- WANG Jiawei, YU Dandan, YIN Qun, *et al.* Forest health evaluation for landscape type of water conservation in Badaling Forest Farm in Beijing [J]. *J Northwest For Univ*, 2015, **30**(1): 233 – 239.
- [17] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *Bell Syst Tech J*, 1948, **27**(3): 379 – 432.
- [18] 芦新建. 大通县水源涵养林类型及其功能评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- LU Xinjian. *Study on the Water Conservation Forest and Its Function Assessment in Datong County* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [19] 陈波, 孟成生, 赵耀新, 等. 冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(3): 216 – 221.
- CHEN Bo, MENG Chengsheng, ZHAO Yaoxin, *et al.* Hydrological effects of forest litters and soil of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the different altitudes of north mountain of Hebei [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26**(3): 216 – 221.
- [20] 刘军. 基于熵权和 TOPSIS 集成的农作物综合评价[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(12): 6078 – 6079.
- LIU Jun. Comprehensive evaluation of crop based on entropy weight coefficient and TOPSIS [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, **38**(12): 6078 – 6079.
- [21] WU Bo, ZHOU Xiaokang, JIN Qun. Participatory information search and recommendation based on social roles and networks [J]. *Multimed Tools Applic*, 2015, **74**(14): 5173 – 5188.
- [22] 王世雷, 贺康宁, 刘可喧, 等. 青海高寒区不同人工林下植被的多样性及生态位研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(11): 67 – 72.
- WANG Shilei, HE Kangning, LIU Kexuan, *et al.* Diversity and niche of different plantation configuration in alpine region in Qinghai Province [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **41**(11): 67 – 72.
- [23] 王伟伟, 杨海龙, 贺康宁, 等. 青海高寒区不同人工林配置下草本群落生态位研究[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(3): 156 – 165.
- WANG Weiwei, YANG Hailong, HE Kangning, *et al.* The study on herb community niche of different plantation configuration in alpine region of Qinghai Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2012, **19**(3): 156 – 155.
- [24] 李校, 耿凤梅, 孟东霞, 等. 不同森林类型物种多样性及影响因子研究[J]. 河北林果研究, 2007, **22**(2): 130 – 133.
- LI Xiao, GENG Fengmei, MENG Dongxia, *et al.* Study on species diversity of different forest types and affecting factors [J]. *Hebei J For Orchard Res*, 2007, **22**(2): 130 – 133.
- [25] 刘凯, 贺康宁, 田赟, 等. 青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(3): 141 – 146.
- LIU Kai, HE Kangning, TIAN Yun, *et al.* Soil characteristics and water conservation function of five forest types in Qinghai alpine region [J]. *J Soil Water Conserv*, 2017, **31**(3): 141 – 146.
- [26] 沈剑波, 雷相东, 舒清态, 等. 国内外森林健康评价指标体系综述[J]. 科技导报, 2011, **29**(33): 72 – 79.
- SHEN Jianbo, LEI Xiangdong, SHU Qingtai, *et al.* Review on forest health evaluation index system [J]. *Sci Technol Rev*, 2011, **29**(33): 72 – 79.
- [27] 郭春燕, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天煤矿复垦区人工林生态系统健康评价[J]. 西北林学院学报, 2017, **32**(5): 83 – 90.
- GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, *et al.* Health assessment of plantation ecosystem in reclamation area of Antaibao Opencast Coal Mine [J]. *J Northwest For Univ*, 2017, **32**(5): 83 – 90.