



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.026

王利娜, 朱清科, 严登华, 等. 黄土高原油松人工林干旱风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 179-186, 195. WANG L N, ZHU Q K, YAN D H, et al. The assessment on drought risk of *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 179-186, 195. (in Chinese)

黄土高原油松人工林干旱风险评价

王利娜¹, 朱清科², 严登华¹, 李蒙¹

1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 北京林业大学水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了揭示黄土高原油松人工林径向生长与干旱之间的关系, 以吴旗县、志丹县和延川县 30 个样地的油松为研究对象, 获取黄土高原及周边 72 个气象站点 1961–2012 年地面气象逐日降水观测资料, 以连续无有效降雨日数作为干旱指标, 分析不同干旱类型与不同径级油松人工林相关性, 进而对黄土高原油松人工林干旱进行风险评价。结果表明: (1) 当年春季轻度干旱和前一年夏季轻度干旱均抑制油松径向生长, 且前一年夏季轻度干旱对油松径向生长的影响更大。(2) 黄土高原油松人工林干旱风险最大的地区靠近研究区西北边界处, 其油松人工林受到干旱胁迫最严重, 因此最不稳定。沙区南缘黄土区与沙区的过渡地区, 干旱风险评价指数次之。其它大部分地区干旱风险评价指数较小, 油松人工林稳定性较高。

关键词: 油松; 径向生长; 干旱; 风险评价; 黄土高原

中图分类号: S791.254 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0179-08

The assessment on drought risk of *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau

WANG Lina¹, ZHU Qingke², YAN Denghua¹, LI Meng¹

- (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the relationship between the radial growth of *Pinus tabulaeformis* plantations and the drought in the Loess Plateau, we took 30 sample plots of *Pinus tabulaeformis* in Wuqi, Zhidan, and Yanchuan counties as the research object, and obtained the ground meteorological observation data of daily precipitation from 1961 to 2012 from 72 weather stations in and around Loess Plateau. We took the number of consecutive days without effective precipitation as a drought index, analyzed the correlation between drought types and different diameter classes of *Pinus tabulaeformis* plantation, and thus assessed the drought risk of *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau. Results showed that: (1) The mild drought in the spring and mild drought in the previous summer could inhibit the radial growth of *Pinus tabulaeformis*, and the latter had more influence on the radial growth of *Pinus tabulaeformis*. (2) The greatest drought risk of *Pinus tabulaeformis* plantations in Loess Plateau was near the northwest border of the study area, where the plantations were under the most severe drought stress and therefore was the most unstable. The transition area between the sand area and the loess area to its south had the second highest drought risk assessment index. Most of the other areas had a relatively low drought risk assessment index and relatively stable *Pinus tabulaeformis* plantations.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; radial growth; drought; risk assessment; Loess Plateau

收稿日期: 2016-11-16 修回日期: 2017-04-13 网络出版时间: 2017-11-21
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171121.1332.003.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51279207; 51409266)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51279207; 51409266)

作者简介: 王利娜(1985-), 女, 河北承德人, 博士后, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: nazi8509@163.com

通讯作者: 严登华(1976-), 男, 安徽人, 教授级高级工程师, 博士(后), 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: 15311111885@163.com

近年来,在全球气候变暖的背景下,干旱等极端水文事件呈现出广发、频发的态势^[1-4]。干旱发生频率和强度的加剧会对树木的径向生长产生影响^[5]。鉴于树木径向生长资料,可提取历年气候与环境的变化信息,进而得出有利或不利的的气候因素,树木径向生长分辨率高,可靠性较高^[6],因而受到科学界的广泛关注^[1-13]。温度、降水、日照和 CO₂ 浓度等气候因子均会对树木径向生长产生影响^[14-17],与其存在着复杂的相关关系^[18],生长季阶段,温度对树木径向生长较复杂,且研究结果也不一致^[19-21];生长季前期降水条件也会影响树木径向生长,存在一定的“滞后效应”^[22];高强度的太阳辐射抑制树木的径向生长^[23]。以往研究多半试图建立单一气候因子与树木径向生长的相关关系,从树木径向生长的特点来探寻气候因子的变化特征,本文试图分析不同径级油松径向生长对不同季节、不同等级干旱的响应。

本文以吴旗县、志丹县和延川县为采样区,共选取 30 个样地油松为研究对象,拟定干旱风险评价指标,以地理信息系统为支撑,采用外包线法,分析整个黄土高原干旱对不同径级油松径向生长的影响,以为油松适宜地分布等提供借鉴。

1 研究区概况

土高原的准确范围,至今尚未统一^[24]。20 世纪 80 年代,由黄土高原地区综合科学考察队所界定的范围:青藏高原东缘以东,阴山山脉以南,太行山脉以西,秦岭山脉以北,位于东经 100°52′ - 114°33′ E,北纬 33°41′ - 41°16′ N 之间,总面积约 62.38 万 km²。包含内蒙古、陕西、青海、宁夏、甘肃、山西与河南 7 省(自治区)。河南省份降水量充足(600 mm 以上),不在研究范围内,不予考虑。青海省份的黄土高原降水量虽偏少,但温度较低,干旱不是主要影响油松径向生长的气象因子,本研究的研究区域见图 1。

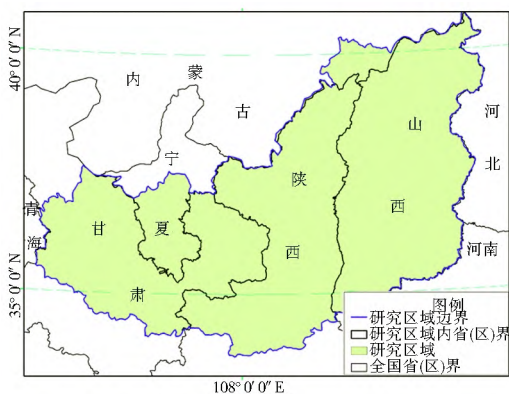


图 1 黄土高原地理位置

Fig. 1 The location of the Loess Plateau

上,等值线以北油松人工林相对较少,往南相反。在 400 mm 左右降水量等值线上选取油松人工林相对较多的吴旗县、志丹县和延川县为采样区,具有一定的代表性。

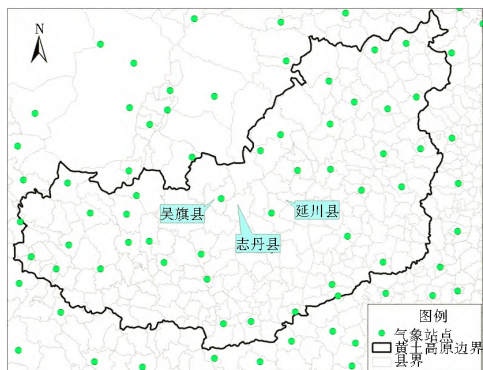


图 2 采样点分布

Fig. 2 The distribution of sampling points

2 材料和方法

2.1 数据来源

2.1.1 样地选择与样品采集

本研究共选取 30 块样地,每块样地为 10 m × 10 m,对样方内的全部油松进行每木检尺,找到平均木和优势木,利用生长锥从不同方向钻取树芯,其平均值即为所取树木径向生长观测数据,对选取的树芯要及时进行晾干、固定、打磨等预处理。首先将样本置于阴凉平坦处晾干,然后用白乳胶固定在木槽中,最后再用 60 号、100 号不用粒度砂纸打磨,打磨至样本表面光滑细腻、轮廓清晰可见,注意打磨时控制力度。通过检验,去除因虫、冻害等导致的伪轮或缺轮,最终样本数量为 112,其基本情况详见表 1。

2.1.2 气象数据获取

本文气象数据是由中国气象局国家气象信息中心提供的黄土高原及周边 72 个气象站点逐日地面气象降水观测资料,数据序列从 1961 年至 2012 年,计算各气象站点连续无有效降雨日数。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱等级划分标准

目领域不同,干旱的定义不同,所采用的干旱指标也不同。如气象干旱指标包括降水距平百分率、降水 Z 指数和标准化降水指标等;农业干旱指标包括土壤含水量指标、作物旱情指标和帕默尔干旱指数(Palmer)等。本文综合考虑干旱的界定、指标适用性、数据获取及计算的难易程度等方面,最终采用连续无有效降雨日数作为本研究的干旱指标,划分标准详见表 2 所示^[25]。其中,春、秋季日降水量小

采样点(图 2)选在 400 mm 左右降水量等值线

表 1 陕北半干旱黄土区油松人工林样地基本情况

Tab. 1 The basic information of *Pinus tabulaeformis* plantation sample plots in semiarid loess area of Shaanxi

地点	样地编号	胸径 / cm	林龄 / a	经度 (°)	纬度 (°)	高程 / m	坡向	坡度 (°)	坡位	沟坡与梁峁	密度 / (株·hm ⁻²)	郁闭度 (%)
吴旗县	1 平均木	7.7	28	108°09.987'	36°55.521'	1 429	阴坡	24	坡上	梁峁坡	4 100	45.2
	1 优势木	13	28									
	2 平均木	8	24	108°09.972'	36°55.534'	1 447	阴坡	32	坡上	梁峁坡	3 900	46
	2 优势木	13	29									
	3 平均木	7.22	23	108°09.960'	36°55.538'	1 438	阴坡	29	坡上	梁峁坡	4 500	38
	3 优势木	13.8	27									
	4 平均木	7.9	22	108°09.960'	36°55.538'	1 438	阴坡	20	坡上	梁峁坡	3 600	35
	4 优势木	16.4	26									
	5 平均木	7.49	23	108°09.960'	36°55.538'	1 438	阴坡	19	坡上	梁峁坡	4 300	37
	5 优势木	11.5	22									
	6 平均木	9.3	/	108°09.937'	36°55.564'	1 418	阴坡	21	坡中	梁峁坡	2 900	52
	6 优势木	15.25	23									
	7 平均木	10.8	27	108°09.942'	36°55.571'	1 410	阴坡	23	坡中	梁峁坡	2 500	30
	7 优势木	16	28									
	8 平均木	8.50	27	108°09.950'	36°55.580'	1 404	阴坡	22	坡中	梁峁坡	3 800	39
	8 优势木	15.5	29									
	9 平均木	9.52	22	108°10.036'	36°55.613'	1 367	半阴坡	44	坡底	沟坡	2 400	28
	9 优势木	15.74	26									
	10 平均木	9.6	22	108°10.037'	36°55.629'	1 368	半阴坡	42	坡底	沟坡	4 800	39
	10 优势木	14.47	26									
11 平均木	7.31	8	108°31.047'	36°55.620'	1 317	阴坡	40	坡上	沟坡	7 600	22	
11 优势木	10.52	11										
12 平均木	8.13	/	108°29.022'	36°42.668'	1 240	半阴坡	41	坡底	沟坡	2 500	39	
12 优势木	14.2	19										
13 平均木	7.9	18	108°29.022'	36°42.668'	1 253	半阴坡	42	坡底	沟坡	2 200	41	
13 优势木	13.35	17										
14 平均木	8.7	17	108°29.779'	36°42.629'	1 257	半阳坡	41	坡底	梁峁坡	2 400	38	
14 优势木	15.3	19										
15 平均木	9.81	17	108°29.793'	36°42.629'	1 250	半阴坡	49	坡底	沟坡	2 200	32	
15 优势木	14.81	21										
16 平均木	11.81	17	108°27.800'	36°41.546'	1 214	阴坡	40	坡底	梁峁坡	900	10	
16 优势木	19.9	21										
17 平均木	12.34	20	108°27.863'	36°41.499'	1 209	阴坡	46	坡底	梁峁坡	1 200	44	
17 优势木	18.11	19										
18 平均木	20.1	37	108°52.935'	36°35.963'	1 604	阴坡	7	坡上	梁峁坡	1 700	85	
18 优势木	28.84	36										
19 平均木	19.71	36	108°52.950'	36°35.957'	1 601	阴坡	28	坡上	沟坡	1 400	80	
19 优势木	29.82	34										
20 平均木	20.39	33	108°52.967'	36°35.948'	1 608	阴坡	12	坡上	梁峁坡	1 500	79	
20 优势木	25.06	35										
延川县	21 平均木	10.5	/	110°13.360'	36°49.717'	817	阴坡	35	坡中	沟坡	3 200	82
	21 优势木	15.31	23									

表 1 陕北半干旱黄土区油松人工林样地基本情况

Tab. 1 The basic information of *Pinus tabulaeformis* plantation sample plots in semiarid loess area of Shaanxi (续表)

地点	样地编号	胸径 / cm	林龄 / a	经度 (°)	纬度 (°)	高程 / m	坡向	坡度 (°)	坡位	沟坡与梁峁	密度 / (株 · hm ⁻²)	郁闭度 (%)
延川县	22 平均木	9.5	23	110°13.619'	36°49.818'	799	阴坡	27	坡中	梁峁坡	4 200	80
	22 优势木	13.5	26									
	23 平均木	11.8	26	110°13.607'	36°49.822'	788	阴坡	14	坡底	沟坡	2 500	60
	23 优势木	16.8	28									
	24 平均木	7.3	23	110°06.179'	36°55.667'	878	阴坡	16	坡上	梁峁坡	6 000	75
	24 优势木	12.8	26									
	25 平均木	7.69	23	110°06.163'	36°55.682'	876	半阴坡	32	坡中	梁峁坡	5 800	89
	25 优势木	11.6	24									
	26 平均木	6.68	22	110°06.168'	36°55.688'	868	阴坡	26	坡底	沟坡	3 900	90
	26 优势木	9.25	/									
	27 平均木	11.52	28	110°14.220'	36°49.880'	764	半阴坡	37	坡底	梁峁坡	2 000	88
	27 优势木	18.7	29									
	28 平均木	11.48	27	110°14.230'	36°49.878'	772	半阴坡	44	坡中	梁峁坡	1 300	50
	28 优势木	16.4	30									
	29 平均木	17.3	28	110°14.223'	36°49.862'	763	阴坡	47	坡中	沟坡	4 000	92
	29 优势木	20.84	26									
	30 平均木	16.76	29	110°14.202'	36°49.871'	761	阴坡	29	坡底	沟坡	3 600	67
	30 优势木	23.92	30									

于 3 mm 的视为无雨日;夏季日降水量小于 5 mm 的视为无雨日。若连续无雨日时间较长,连跨两季,则以无雨日数较多的季节划分标准为依据;若连跨三季,规定为特大干旱^[26]。

表 2 连续无雨日数旱情等级标准

Tab. 2 Number of consecutive days without precipitation and drought grades

季节	不同旱情等级的连续无雨日数/d			
	轻度干旱	中度干旱	严重干旱	特大干旱
春季(3月-5月)	15~30	31~50	51~75	>75
夏季(6月-8月)	10~20	21~30	31~50	>50
秋季(9月-11月)	15~30	31~50	51~75	>75
冬季(12月-月)	20~30	31~60	61~80	>80

2.2.2 样品测定方法

本研究采用目测定年法和示意图定年法相结合的方法定年。首先,在定年之前,对所有树芯样本都进行一次目估,初步了解每个样本的基本情况(包括年轮走向、清晰程度以及是否有结疤和病腐等)。其次,选取生长正常的部分开始定年,既有利于识别假年轮与丢失年轮,定年准确,也有利于在分析年轮遇到疑问时返回检查。最后,年代的确定,根据树轮的解剖学特征,若取样是在春季或夏季,树木正在生长,当年的早材细胞正在分裂,未形成年轮,因此测

得的最后一个年轮就是取样年代的前一年;若取样是在秋季或冬季,树木停止生长,晚材细胞形成,因此测得的最后一个年轮就是取样的年代。本研究样本采集是在 2014 年 7 月,因此年轮宽度测定的最后一年为 2013 年。

2.2.3 相关性分析

本文采用 SPSS 相关分析法分析油松年轮宽度与干旱的相关关系,该方法的理论基础是所有的研究对象之间均存在着某种关系,并利用不同统计指标表示这种关系的强弱过程。一般选取皮尔逊相关系数(Pearson)描述简单连续变量的相关性,即变量间相关关系的紧密程度。

总体相关系数 p 的计算公式:

$$p = \frac{C\alpha(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (1)$$

式中: $C\alpha(X, Y)$ 为变量 X 、 Y 协方差; $Var(X)$ 为变量 X 方差, $Var(Y)$ 为变量 Y 方差。

样本相关系数 r 的计算公式:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: $-1 \leq r \leq 1$, 当 $r > 0$ 时,表明变量间呈正相关,即其中一个变量增大(减小)时,另一个变量也增大(减小);当 $r < 0$ 时,表明变量间呈负相关,即其中一

个变量增大(减小)时,另一个变量反而减小(增大);当 $r = 0$ 时,表明变量间无线性相关性。 r 的绝对值越大,表明变量间相关程度越紧密。一般可将相关性由强到弱划分为三个阶段: $0.7 \leq |r| < 1$ 时,高度线性相关; $0.4 \leq |r| < 0.7$ 时,显著线性相关; $|r| < 0.4$ 时,低度线性相关。

通过统计样本相关系数判断总体中变量间的相关性,采用 t 检验:

$$t = \frac{r \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

假如 t 检验显著,则拒绝原假设($p = 0$),则变量间存在线性相关;假如 t 检验不显著,则接受原假设($p = 0$),则变量间不存在线性相关。

2.2.4 干旱风险评价指数拟定

由于黄土高原水资源严重匮乏,水是该区生态环境恢复与重建的根本,年降雨量是植物生长的主要限制因素,且抑制油松径向生长的干旱发生程度是影响油松径向生长的主要因素。因此,本文拟定的干旱风险评价指数以降水为主要因素,其基本原理是抑制油松径向生长的不同类型干旱发生次数与多年平均降雨量比值,公式如下:

$$I = \frac{C}{P} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C 为抑制油松径向生长的不同类型干旱发生次数; P 为多年平均降雨量(mm)。

3 干旱与油松径向生长的相关性

3.1 油松径向生长过程

3.1.1 平均木油松径向生长过程

吴旗、志丹、延川油松平均木径向生长过程如图3所示。由图可知,不同采样点油松平均木径向生长整体呈减小趋势,可分为快速生长期和生长缓慢期两个生长阶段,前15年左右属于快速生长期,后15年左右属于生长缓慢期。快速生长期,延川油松径向生长呈显著减小趋势,径向生长量最大值4.38 mm,最小值1.17 mm,平均值2.53 mm。而吴旗、志丹油松径向生长减小缓慢,吴旗县油松径向生长量最大值、最小值和平均值分别为3.07 mm、1.01 mm和2 mm。志丹县油松径向生长量最大值、最小值和平均值分别为5.53 mm、1.95 mm和4 mm。生长缓慢期,三县油松径向生长变化趋势相似,均不显著。吴旗县油松径向生长量最大值、最小值和平均值分别为1.97 mm、0.52 mm和1.09 mm。志丹县油松径向生长量最大值、最小值和平均值分别为3.57 mm、1.13 mm和1.98 mm。延川县油松径向

生长量最大值、最小值和平均值分别为1.69 mm、0.83 mm和1.27 mm。

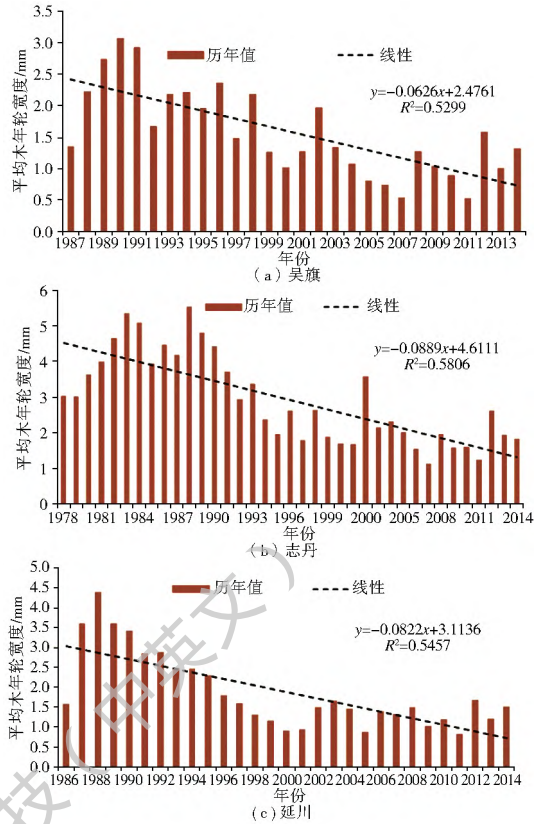


图3 不同采样点(a)吴旗、(b)志丹、(c)延川油松平均木径向生长过程

Fig. 3 The radial growth process of average *Pinus tabulaeformis* in (a) Wuqi, (b) Zhidan, and (c) Yanchuan

3.1.2 优势木油松径向生长过程

图4为吴旗、志丹、延川油松优势木径向生长过程,由图可知,其径向生长过程与平均木相似,整体呈减小趋势。快速生长阶段,吴旗县径向生长量最大值、最小值和平均值分别为4.22 mm、1.12 mm和3 mm;志丹县分别为7.40 mm、3.38 mm和5 mm;延川县分别为4.87 mm、1.62 mm和3.48 mm。生长缓慢阶段,不同采样点油松径向生长变化不显著,吴旗、志丹、延川油松径向生长量最大值分别为3.05 mm、4.71 mm和2.36 mm,最小值分别为0.63 mm、1.79 mm和1.07 mm,平均值分别为1.56 mm、2.84 mm和1.84 mm。

综上所述,油松的生物学特征使得不同径级油松径向生长过程相似,但由于不同径级油松对资源利用程度不同以及资源环境的变化等使得油松径向生长量之间存在很大差异。

3.2 当年不同类型干旱对油松径向生长的影响

本节中不同类型干旱具体包括当年春季轻度干旱、中度干旱、严重干旱和特大干旱,夏季轻度干旱、中度干旱、严重干旱和特大干旱,秋季轻度干旱、中

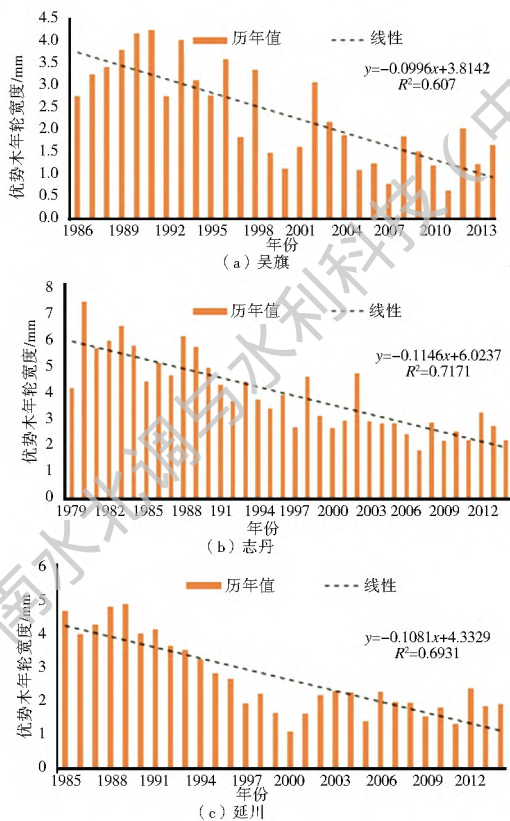


图 4 不同采样点 (a) 吴旗、(b) 志丹、(c) 延川油松优势木径向生长过程

Fig. 4 The radial growth process of dominant *Pinus tabulaeformis* in (a) Wuqi, (b) Zhidan, and (c) Yanchuan

度干旱、严重干旱和特大干旱, 冬季轻度干旱、中度干旱、严重干旱和特大干旱。对所有干旱类型进行

逐一筛选, 因夏、秋季节基本上从未发生严重干旱和特大干旱, 且油松在冬季停止径向生长, 因此剔除。最终结果详见表 3。从表中可以得出, 不同径级油松径向生长与当年春季轻旱发生次数均存在显著负相关关系, 说明当年春季发生轻度干旱会抑制油松径向生长。当年春季严重干旱与平均木油松径向生长存在显著正相关关系, 可能是因为在一般情况下, 长时间干旱结束后会伴随一场降雨。两种径级油松径向生长与其他类型干旱无显著相关性。

3.3 前一年不同类型干旱对油松径向生长的影响

本节中的干旱类型具体包括前一年春季轻、中、重旱和特大干旱, 夏季轻、中、重旱和特大干旱, 秋季轻、中、重旱和特大干旱, 冬季轻、中、重旱和特大干旱。对干旱类型进行筛选, 夏、秋季几乎不发生严重干旱和特大干旱, 因此去除。油松的径向生长高峰出现再 6 月以后, 因此前一年的春季与当年油松径向生长隔了一个生长期, 没有直接关系, 同样去除。最终结果如表 4 所示, 由表可知, 不同径级油松径向生长与前一年夏季轻旱存在极显著负相关关系, 说明前一年夏季轻旱抑制油松径向生长。平均木、优势木油松径向生长与前一年冬季重旱和特大干旱呈极显著、显著正相关关系, 可能原因是降雨发生频率随干旱等级增加而增大, 如冬季发生重旱和特大干旱, 春季更易形成降雨。

表 3 不同径级油松径向生长与当年不同类型干旱发生次数相关系数统计

Tab. 3 The correlation coefficient between radial growth of average and dominant *Pinus tabulaeformis* and frequency of different drought types in the same year

不同径级	相关性系数	春轻旱	春中旱	春重旱	春特旱	夏轻旱	夏中旱	秋轻旱	秋中旱
平均木	Pearson 相关性	-0.082*	-0.020	0.098*	-0.024	-0.055	-0.006	0.059	0.016
	显著性(双侧)	0.040	0.616	0.015	0.552	0.173	0.874	0.141	0.699
	N	623	623	623	623	623	623	623	623
优势木	Pearson 相关性	-0.084*	-0.017	0.069	0.003	-0.047	-0.048	0.029	-0.030
	显著性(双侧)	0.025	0.658	0.068	0.943	0.215	0.205	0.443	0.433
	N	709	709	709	709	709	709	709	709

表 4 不同径级油松径向生长与前一年不同类型干旱发生次数相关系数统计

Tab. 4 The correlation coefficient between radial growth of average and dominant *Pinus tabulaeformis* and frequency of different drought types in the previous year

不同径级	相关性系数	春轻旱	春中旱	春重旱	春特旱	夏轻旱	夏中旱	秋轻旱	秋中旱
平均木	Pearson 相关性	-0.108**	0.052	-0.015	0.042	-0.031	0.002	0.105**	0.131**
	显著性(双侧)	0.007	0.196	0.718	0.298	0.436	0.966	0.009	0.001
	N	622	622	622	622	623	623	623	623
优势木	Pearson 相关性	-0.137**	0.091*	0.031	0.081*	-0.026	0.023	0.086*	0.082*
	显著性(双侧)	0.000	0.016	0.415	0.031	0.492	0.538	0.022	0.030
	N	708	708	708	708	709	709	709	709

4 油松干旱风险评价结果

依据当年春季轻旱拟定的干旱风险评价指数在黄土高原的空间分布见图 5, 可以看出干旱风险评价指数自西南向东北整体呈递增趋势, 研究区北部边界处的沙区黄土区, 油松人工林干旱风险指数最高, 受到的干旱胁迫最严重。沙区南缘的过渡地区, 风险指数较小。黄土高原西南地区、南部地区和东北地区干旱风险评价指数较小, 油松人工林稳定性较高。

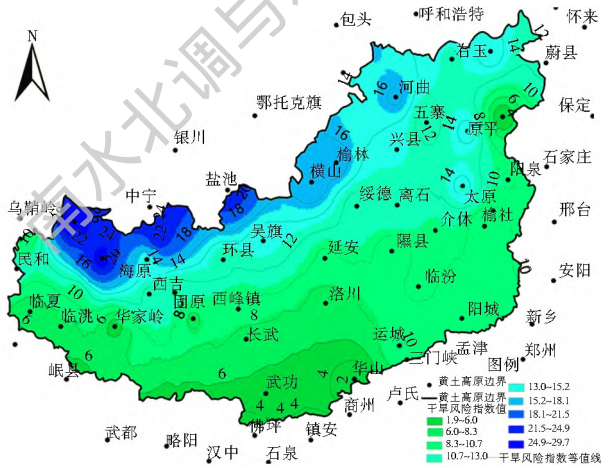


图 5 黄土高原油松干旱风险指数(春轻)空间分布

Fig. 5 The distribution of drought risk index of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau(mild drought in spring)

基于前一年夏季轻度干旱发生次数拟定的干旱风险评价指数在黄土高原的空间分布见图 6。由图可知, 其空间分布特征是: 从西南向东北整体呈递增趋势, 最大值出现在沙区的黄土区, 其它大部分地区干旱风险评价指数较小。但是与图 5 相比, 沙区的黄土区、黄土区与沙区的过渡地区面积均相对减小。

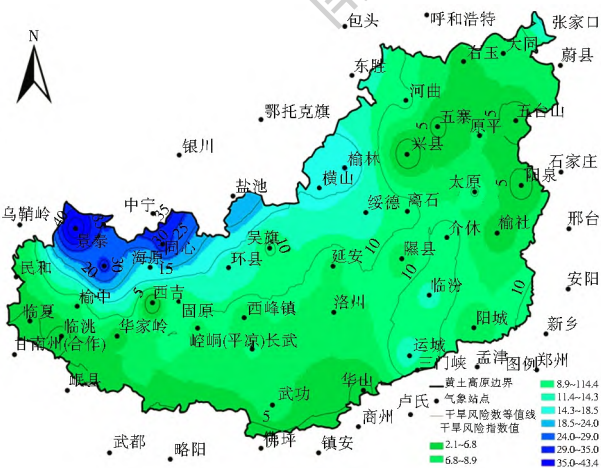


图 6 黄土高原油松干旱风险指数(夏轻)空间分布

Fig. 6 The distribution of drought risk index of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau (mild drought in summer)

综合考虑当年春季轻旱与前一年夏季轻旱发生

次数, 拟定黄土高原油松人工林干旱风险评价指数, 其空间分布见图 7。由图可知, 风险指数最高的地区与基于前一年夏季轻旱拟定的指数相似。在黄土区与沙区过渡地区, 风险指数分布特征与基于当年春季轻旱拟定的指数相似, 其余地区风险指数较小。

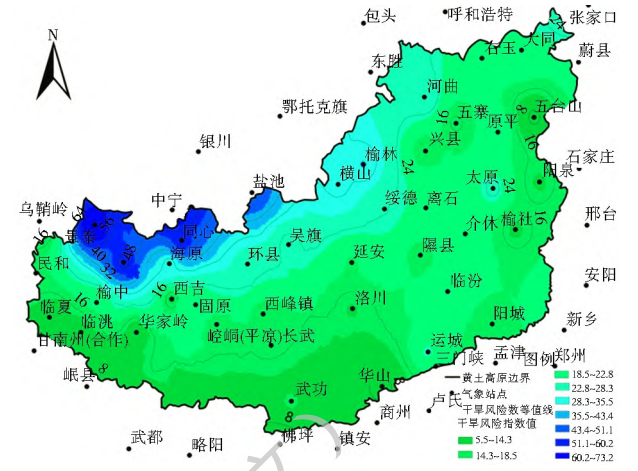


图 7 黄土高原油松干旱风险指数(总和)空间分布

Fig. 7 The distribution of drought risk index of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau (sum of mild drought)

5 结论

本文以吴旗县、志丹县和延川县 30 个样地的油松为研究对象, 获取黄土高原及周边 72 个气象站点 1961- 2012 年地面气象逐日降水观测资料, 选取连续无有效降雨日数作为干旱指标, 分析不同干旱类型与不同径级油松人工林相关性, 进而对黄土高原油松人工林干旱进行风险评价, 主要结论如下。

(1) 不同径级油松径向生长与当年春季轻旱存在显著负相关关系, 与前一年夏季轻旱存在极显著负相关关系, 说明当年春季、前一年夏季轻旱抑制油松径向生长, 且前一年夏季轻旱影响更大。

(2) 油松人工林干旱风险最大的地区靠近黄土高原西北边界处, 其油松人工林受到干旱胁迫最严重, 最不稳定。沙区南缘黄土区与沙区的过渡地区, 油松人工林干旱风险降低。其它大部分地区干旱风险评价指数较小, 油松人工林干旱风险最低, 其稳定性较高。

参考文献 (References):

[1] IPCC: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C. E., Cambridge University Press, Cambridge, U K, 976 pp, 2007.

[2] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候

- 变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158. (ZHANG J Y, WANG G Q, HE R M, et al. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River basin and its response to climate change[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 153-158. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2009.02.001.
- [3] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286. (YANG T, LU G H, LI H H, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 279-286. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32-1309/P.20110313.2241.028.
- [4] 王刚, 严登华, 张冬冬, 等. 海河流域 1961 年-2010 年极端气温与降水变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): F6. (WANG G, YAN D H, ZHANG D D, et al. Trend analysis of variations in extreme precipitation and temperature in the Hai River Basin from 1961 to 2010[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): F6. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01001.
- [5] 姜庆彪, 赵秀海, 高露双, 等. 不同径级油松径向生长对气候的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3859-3865. (JIANG Q B, ZHAO X H, GAO L S, et al. Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3859-3865. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201109091323.
- [6] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(2): 345-351. (FAN W Y, WANG X A. Advances in studies on the relationships between tree ring width and climatic factors[J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin. 2004, 24(2): 345-351. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2004.02.028.
- [7] CARRER M, NOLA P, MOTTA R, Urbani C. Contrasting tree ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area[J]. Oikos, 2010, 119: 1515-1525. DOI: 10.1111/j.1609-0706.2010.18293.x.
- [8] ZHANG Q B, HEBDA R J. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada[J]. Can J For Res, 2004, 34: 1946-1954. DOI: 10.1139/x04-078
- [9] WANG T, REN H, MA K. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China[J]. Trees Struct Funct, 2005, 19: 736-742. DOI: 10.1007/s00468-005-0003-9.
- [10] YU D, WANG G G, DAI L, et al. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China[J]. For Ecol Manage, 2007, 240: 105-113. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.12.014.
- [11] 陈晶晶, 李钢铁, 秦艳, 等. 浑善达克沙地榆树年轮结构对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 80-87. (CHEN J J, LI G T, QIN Y, et al. Response of tree ring structure of *Ulmus pumila* var. *sabulosa* to climate change in the Otindag Sand Land[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 80-87. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2015.01.12.
- [12] 吴普, 王丽丽, 黄磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 43-52. (WU P, WANG L L, HUANG L. A preliminary study on the tree ring sensitivity to climate change of five endemic conifer species in China[J]. Geographical Research, 2006, 25(1): 43-52. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.01.006.
- [13] 胡娜娜, 延军平, 李双双, 等. 气候暖干化背景下黄土高原旱涝时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 705-711. (HU N N, YAN J P, LI S S, et al. Spatiotemporal evolution of drought and flood in the Loess Plateau under climate drying warming[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 705-711. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2013.04.014.
- [14] 黄荣凤, 赵有科, 吕建雄, 等. 侧柏年轮宽度和年轮密度对气候变化的响应[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 78-82. (HUANG R F, ZHAO Y K, LV J X, et al. Response of ring width and ring density of *Platycladus orientalis* to climate change in Beijing[J]. Scientia silvae sinicae, 2006, 42(7): 78-82. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.07.014.
- [15] 成泽虎, 丁坤元, 刘艳红. 北京油松天然林和人工林乔木层生产力与气候因子的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 177-183. (CHENG Z H, DING K Y, LIU Y H. Relationship between arborous layer productivity and climatic factors in *Pinus tabulaeformis* natural forests and plantations in Beijing[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(5): 177-183. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.05.028.
- [16] 白学平, 常永兴, 张先亮, 等. 近 30 年快速升温对两种典型小地形上兴安落叶松径向生长的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 1-13. (BAI X P, CHANG Y X, ZHANG X L, et al. Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical micro-topographies in the recent 30 years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.201612.036.
- [17] 于健, 徐倩倩, 刘文慧, 等. 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 24-35. (YU J, XU Q Q, LIU W H, et al. Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 24-35. (in Chinese)) DOI: 10.17521/cjpe.2015.0216.
- [18] BORGAONKAR H P, G B PANT, K R KUMAR. Tree-ring chronologies from western Himalaya and their dendroclimatic potential[J]. International Association of Wood Anatomists, 1999, 20: 295-309. DOI: 10.1163/22941932-90000692.
- [19] AKKEMİK. Dendroclimatology of umbrella pine (*Pinus pine L.*) in Istanbul, Turkey[J]. Tree Ring Bulletin, 2000, 56: 17-20.

(下转第 195 页)

- ods for water resources management[Z]. 2013. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国水利部, 节水型社会建设评价指标体系(试行)[Z]. 2005 (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Evaluation index system of water saving society construction (for Trial Implementation)[Z]. 2005. (in Chinese))
- [25] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发《节水型城市申报与考核办法》和《节水型城市考核标准》的通知[Z]. 2006 (Ministry of Construction of People's Republic of China, National Development and Reform Commission of People's Republic of China, Notice on issuing the measures for the declaration and assessment of water saving cities and the assessment standards for water saving cities [Z]. 2006. (in Chinese))
- [26] 洪娟. 张掖市节水型社会建设效果后评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (HONG J. Research on the effect evaluation of water saving and conservation society in Zhangye[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [27] 张晏, 壮歌德. 实行“最严格”的水资源管理制度[J]. 世界环境, 2011(2): 20-21. (ZHANG Y, ZHUANG G D. Implementing a powerful management system of water resources [J]. World Environment, 2011(2): 20-21. (in Chinese))
- [28] 左其亭, 李可任. 最严格水资源管理制度理论体系探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 34-38. (ZUO Q T, LI K R. Discussion on theoretical system of the strictest water resources management system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(1): 34-38. (in Chinese)) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2013.01034.
- [29] 2014 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (2014 China water resources bulletin[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015 (in Chinese))
- [30] 城市供水统计年鉴[M]. 北京: 中国城镇供水协会, 2015. (Statistical yearbook of urban water supply[M]. Beijing: China Urban Water Supply Association, 2015. (in Chinese))

(上接第 186 页)

- [20] MÄKINEN H, P NÖJD & K MIELIKÄ inen. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst.) in south Finland [J]. *Trees*, 2001, 15: 177-185. DOI: 10.1007/s004680100089.
- [21] SZEICZ J M, G M M DONALD. A 930 year ring-width chronology from moisture sensitive white spruce (*Picea glauca* Moench) in the northwestern Canada [J]. *The Holocene*, 1996, 6: 345-351. DOI: 10.1177/095968369600600309.
- [22] CARITAT A, E GUTIERREZ, M MOLINAS. Influence of weather on cork ring width[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20: 893-900.
- [23] LIANG E Y, X M SHAO, Y X HU, et al. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of Meyer spruce (*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi arid grassland, north China [J]. *Trees*, 2001, 15: 230-235. DOI: 10.1007/s004680100097.
- [24] 朱清科, 张岩, 赵磊磊, 等. 陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 35-44. (ZHU Q K, ZHANG Y, ZHAO L L, et al. Nearly natural vegetation restoration and afforestation on the Loess Plateau of northern shaanxi[M]. Beijing: Science press., 2012: 35-44. (in Chinese))
- [25] SL 424-2008, 水利部旱情等级标准[S]. 2008. (SL 424-2008 of the people's republic of China, ministry of water resources drought rating standard[S]. (in Chinese))
- [26] 干旱评估标准(试行)[S]. 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 2006. (Drought assessment standard(trial)[S]. The State Flood Control and Drought Relief Headquarters Office, 2006. (in Chinese))