

## 基于灰色系统分析的井冈山杉木年轮生长的气候因子研究

李建, 张国文, 刘阳 (山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东济南 250013)

**摘要** [目的] 研究中亚热带井冈山地区杉木年轮宽度与气候要素之间的关系。[方法] 采用灰色系统方法研究杉木年轮与气候因子之间的关联性。[结果] 影响杉木年轮生长气候因子的关联度为年均湿润度指数(0.707 3) > 年均降水量(0.687 0) > 年均蒸发量(0.662 4) > 年均温度(0.596 8) > 年最高温度(0.559 4) > 年最低温度(0.542 5); 年均降水量和年均温度的综合作用即年均湿润度指数是影响井冈山地区杉木年轮生长的主要因子, 降水因子次之, 最后是温度因子。[结论] 该研究为研究暖湿气候条件下中亚热带地区气候变化与未来森林群落结构和组成提供科学依据。

**关键词** 杉木; 年轮宽度; 气候因子; 灰色关联度

**中图分类号** S718.45; Q945 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)22-0092-04

### Analysis of the Relationship of Tree Ring Growth of Chinese Fir with Climatic Factors by Grey System in Jinggangshan Area LI Jian, ZHANG Guo-wen, LIU Yang (Shandong Academy of Environmental Science Co., Jinan, Shandong 250013)

**Abstract** [Objective] To study the relationship between the tree ring width and climatic factors. [Method] An artificial Chinese fir forest, located in the Jinggangshan area of Jiangxi Province in China, was selected to explore the effect of climatic factors on tree ring growth. [Result] The order of the relational degrees of the climatic factors that influenced the tree ring growth of Chinese fir was the mean annual humidity index (0.707 3) > mean annual precipitation (0.687 0) > mean annual evaporation (0.662 4) > mean annual temperature (0.596 8) > annual extreme maximum temperature (0.559 4) > annual extreme minimum temperature (0.542 5). The mean annual humidity index was the main factor affecting the tree ring growth of Chinese fir in mid-subtropical areas, followed by precipitation and then temperature. [Conclusion] The result provides a scientific basis for studying the effect of climate change on tree growth in sub-tropical regions, as well as information on the interaction between the structure and composition of forest communities and climate change under warm and humid climatic conditions.

**Key words** Chinese fir; Tree ring width; Climatic factors; Grey relational degree

全球气候变化是人类生存所面临的重大问题, 随着近年来异常气候的频繁发生, 人们对气候变化载体的研究也更加深入<sup>[1]</sup>。树木年轮作为研究气候变化的一种代用资料, 以其测年准确、连续性强、分辨率高和易于获取复本等特点而被广泛应用<sup>[2]</sup>。树木径向生长的主要特征之一是树木年轮的形成与变异, 除受树木本身的遗传因子控制外, 还受环境因子的制约<sup>[3]</sup>。树木在生长过程中年轮的形成都受当年及前一年气候因子的影响, 这种影响对树木年轮的生长和形成尤为重要<sup>[4]</sup>。年轮不仅能够记录树木的年龄, 而且能够记载过去气候的变化, 同时气候因子与树木径向生长的密切关系也能够提供未来气候变化背景下树木生长的模式<sup>[5]</sup>。我国自20世纪70年代以来, 对树木年轮气候学的研究主要集中在青藏高原、西北干旱半干旱地区以及东北地区<sup>[6]</sup>。邵雪梅等<sup>[7]</sup>在青海德令哈地区的研究得出了该地区千年降水变化的规律; 梁尔源等<sup>[8]</sup>在内蒙古草原沙地对白桦年轮生长指数的变异进行了研究, 通过年轮与气候变化的规律得出沿锡林河流域中部的沙带上可以进行白桦种植的大面积种植; 郑广宇等<sup>[5]</sup>在东北帽儿山地区研究了兴安落叶松人工林树木年轮与气候的响应关系, 得出帽儿山地区在过去50年的年均温度上升达显著水平。在暖湿气候条件下, 树木年轮与气候因子(降水、温度等)之间的相关性不强, 树木年轮的敏感性较弱, 因此, 在热带亚热带地区开展杉木年轮与气候因子之间关系的研究较少。

杉木作为我国南方造林的主要树种, 素有“北方杨树, 南方杉木”的美称, 在我国南方广泛种植。因此, 选用杉木为研

究样本开展亚热带地区树木年轮生长与气候变化关系的研究意义重大。灰色关联分析作为一种常用的分析方法, 以其原理明确, 应用简单, 在经济、能源和生态等领域广泛应用<sup>[9-10]</sup>, 而应用灰色关联分析的方法进行树木年轮与气候变化的研究鲜见报道。笔者采用灰色关联系统进行井冈山地区杉木年轮与温度和降水等气候因子之间的灰色关联性分析, 以期揭示中亚热带地区气候变化对树木生长的影响, 也可为研究暖湿气候条件下未来气候变化对森林群落的影响提供科学依据。

#### 1 研究区概况与研究方法

**1.1 研究区概况** 研究区位于井冈山国家级自然保护区内, 地理位置为 114°6′~114°18′E, 26°30′~26°40′N, 为南岭山地向北延伸于湘赣边境罗霄山脉中段的一组山体, 属隆起的山地丘陵区, 山体巍峨, 沟壑纵横。平均海拔 381.5 m, 最高海拔 1 841 m, 其中海拔在 1 000 m 以上山峰有 50 余座, 是中亚热带森林生态系统保存完整的典型地区之一。该区域属于亚热带湿润气候区, 年均气温 16.7 °C, 年均降水量 1 610.8 mm, 年均蒸发量 1 603.8 mm, 年均日照时数 1 680.9 h。降水主要集中在 4—6 月, 约占全年降水量的 49%。极端最低气温 -7.6 °C, 极端最高温度 39.2 °C, ≥10 °C 积温 5 393 °C, 无霜期 273 d。

**1.2 气象资料来源** 所用气象资料来源于研究区的小型气象站并结合井冈山气象局(1977—2017年)的气象资料。井冈山地区降水主要集中在 4—6 月, 雨热不同期, 存在干湿季节(图 1)。

**1.3 研究方法** 按照国际年轮资料库的要求, 在距离地面 1.3 m 处, 在每棵树上钻取 2~3 个木芯, 经过筛选后剔除不合格的样芯, 将木芯放入带编号的吸管中保存, 然后带回实验

**作者简介** 李建(1986—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 硕士, 从事环境规划与管理方面的研究。

**收稿日期** 2018-04-08; **修回日期** 2018-04-12

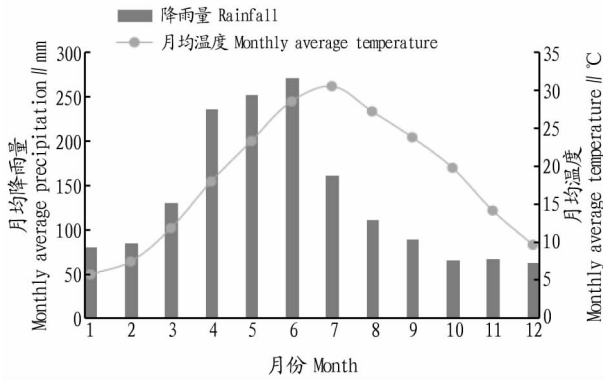


图 1 井冈山地区多年月均降水量和月均温度

Fig.1 Average monthly precipitation and average monthly temperature for many years in Jiayangshan Area

室进行测量<sup>[11]</sup>。该研究选取 30 棵杉木,共获取 60 个样芯<sup>[12-13]</sup>。杉木人工林样地及样本基本情况:海拔 220 m,坡度 7°,坡中,南坡,树高 16.7 m,胸径 21.6 cm,郁闭度 0.75,密度 1 620 株/hm<sup>2</sup>。

**1.4 灰色关联度分析** 灰色关联度是一种多因素分析方法,通过影响比较序列和参考序列之间关联系数的大小,反映影响比较序列和参考序列的密切程度<sup>[14]</sup>。灰色关联法定量考虑了多个因子的作用,尽可能多地考虑到每一个因素的影响,得出比较切合实际的综合性评判指标<sup>[15-16]</sup>,这类类似于大数据的评判观点,从而使评估结果更加准确有效,避免人为评估的主观性<sup>[17]</sup>。该研究应用灰色系统分析方法对影响杉木年轮生长的年均温度、年最低温度、年最高温度、年均降水量、年均蒸发量和年均湿润度指数进行灰色关联分析,根据灰度值对各个因子进行排序,找出影响杉木年轮生长的主要影响因子。

**1.4.1 数据的无量纲化处理。**首先选定一个参考指标数据序列: $X_0 = [X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(k)]$ ,设定影响比较序列: $X_i = [X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(k)] (i = 1, 2, \dots, n)$ 。用序列每个值

减去该序列最小值除以该序列最大值与最小值的差,进行无量纲化处理,转化为可比较的计算序列。选定的参考序列为杉木年轮的宽度值。无量纲化公式: $X_0'' = (X_0 - X_{0\min}) / (X_{0\max} - X_{0\min})$ ;  $X_i'' = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。对无量纲的数据进行差值计算,即影响比较序列与参考序列差值的绝对值,差值序列计算公式: $\Delta_{i(k)} = |X_i''(k) - X_0''(k)|$ 。

**1.4.2 关联系数的计算。**关联系数的计算公式: $L_i(k) = (\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}) / (\Delta_{i(k)} + \rho\Delta_{\max})$ ,式中, $\rho$ 为评判系数,用来削弱 $\Delta_{\max}$ 值过大而失真的影响, $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 为差值序列的最小值和最大值,取值范围为 $[0, 1]$ 。 $\rho$ 取 0.5。

**1.4.3 灰色关联度值计算。**关联度值的计算公式: $r_i = \sum L_i(k) / n$ ,式中, $r_i$ 为关联度值。

**1.5 数据处理** 试验数据采用 Excel 软件和 SPSS19 软件进行处理和分析。

**2 结果与分析**

以杉木年轮宽度数据为参考序列( $X_0$ ),以年均降水量( $X_1$ )、年均蒸发量( $X_2$ )、年均温度( $X_3$ )、年最低温度( $X_4$ )、年最高温度( $X_5$ )、年均湿润度指数( $X_6$ )(表 1)6 个气候因子的数据为影响比较序列进行灰色关联分析,从关联度值大小分析影响杉木年轮生长的气候因子的大小关系。采用上述计算方法和公式计算得出比较序列与参考序列的关联度值(表 2)。由表 2 可知,参照序列的关联度值:年均湿润度指数(0.707 3)>年均降水量(0.687 0)>年均蒸发量(0.662 4)>年均温度(0.596 8)>年最高温度(0.559 4)>年最低温度(0.542 5)。从排序结果可知,年均湿润度指数与杉木年轮宽度值的灰色度值最大,其次为年均蒸发量和年均降水量,最后为年均温度、年最高温度和年最低温度,这表明影响杉木年轮生长的主导因子是年均湿润度指数因子,其次是降水因子,最后是温度因子。

表 1 杉木年轮生长与气候因子关联度分析的原始数据

Table 1 Original data of the correlation degree analysis between Chinese fir tree ring growth and climate factors

年份 Year	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
1977	6.06	1654.09	1495.40	14.45	-2.57	33.86	113.30
1978	6.91	1608.95	1536.88	14.95	-1.49	36.04	106.55
1979	7.74	1398.28	1405.90	14.85	-2.57	35.44	93.22
1980	6.07	1545.29	1574.79	14.65	-3.07	35.84	104.42
1981	6.28	1447.97	1574.69	15.74	-1.29	37.03	91.07
1982	6.88	1703.79	1498.56	16.24	-2.18	35.54	103.89
1983	6.13	1694.39	1571.72	15.94	-3.37	35.05	105.24
1984	6.25	1607.36	1580.54	17.33	-6.53	37.22	91.85
1985	5.38	1596.18	1623.90	15.35	-2.57	36.04	102.98
1986	5.66	1665.58	1508.17	15.84	-4.55	38.02	104.10
1987	5.08	1581.23	1526.18	15.05	-5.54	34.75	104.03
1988	4.47	1574.20	1442.73	14.65	-2.08	36.14	106.37
1989	4.08	1446.19	1299.67	13.56	-2.97	35.05	105.56
1990	4.62	1579.35	1490.94	15.15	-2.08	37.22	103.23
1991	4.38	1597.07	1681.42	15.94	-1.58	35.74	99.20

续表 1

年份 Year	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
1992	3.66	1607.07	1571.23	15.15	-2.77	35.54	105.04
1993	3.33	1571.53	1517.57	15.25	-3.66	38.02	102.05
1994	4.39	1532.72	1497.57	16.24	-1.58	36.93	93.46
1995	3.16	1577.27	1520.05	15.94	-2.48	36.33	97.97
1996	3.31	1552.02	1494.70	15.05	-3.07	36.73	102.11
1997	3.09	1632.11	1486.58	16.53	-7.52	36.53	97.73
1998	3.80	1580.34	1536.38	16.73	-1.88	36.83	93.52
1999	3.59	1548.86	1488.76	17.03	-2.28	38.02	90.05
2000	2.82	1734.78	1682.60	16.04	-2.57	36.53	107.09
2001	3.13	1616.08	1582.32	15.25	-3.37	38.02	104.94
2002	2.92	1570.54	1514.11	15.74	-6.34	36.33	98.77
2003	2.61	1730.82	1684.88	16.24	-4.06	38.12	105.53
2004	2.19	1850.21	1768.34	14.65	-5.05	37.62	125.02
2005	2.34	1544.40	1489.85	15.74	-2.08	36.33	97.13
2006	2.44	1508.86	1458.37	16.34	-1.29	38.02	91.45
2007	2.29	1598.65	1553.71	16.93	-1.09	38.71	93.49
2008	2.62	1418.47	1387.49	16.34	-1.49	35.84	85.97
2009	2.08	1511.63	1487.77	16.63	-2.57	36.83	89.98
2010	2.28	1564.20	1512.32	15.94	-3.37	38.21	97.16
2011	1.95	1559.05	1504.21	15.74	-3.17	37.03	98.05
2012	1.85	1553.41	1499.45	15.64	-1.49	38.81	98.32
2013	1.85	1414.61	1387.29	16.24	-1.58	37.22	86.26
2014	1.69	1600.24	1604.20	13.27	-1.78	37.13	119.42
2015	1.73	1418.57	1387.58	15.54	-1.88	38.02	90.36
2016	1.58	1570.34	1510.54	15.25	-2.77	37.92	101.97
2017	1.71	1554.00	1503.22	16.14	-2.87	38.02	95.34

表 2 杉木年轮生长与气候因子关联度分析的灰色关联度

Table 2 Grey correlation degree of Chinese fir rings growth and climate factor correlation analysis

年份 Year	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$
1977	0.696 0	0.585 0	0.489 2	0.976 5	0.382 3	0.900 9
1978	0.477 3	0.502 2	0.439 8	0.901 5	0.464 7	0.511 9
1979	0.323 4	0.380 4	0.421 5	0.654 4	0.409 7	0.366 9
1980	0.485 4	0.676 7	0.482 0	0.765 0	0.525 3	0.577 5
1981	0.437 5	0.799 5	0.836 3	0.636 1	0.850 4	0.446 5
1982	0.695 4	0.517 5	0.785 6	0.904 0	0.468 9	0.536 0
1983	0.835 0	0.768 2	0.891 3	0.825 0	0.486 8	0.668 4
1984	0.620 8	0.782 3	0.649 0	0.428 3	0.873 4	0.444 3
1985	0.727 2	0.866 8	0.863 8	0.725 4	0.736 7	0.747 0
1986	0.867 1	0.709 3	1.021 6	0.696 9	0.710 1	0.727 0
1987	0.743 1	0.887 3	0.820 8	0.636 5	0.554 1	0.848 0
1988	0.848 0	0.767 7	0.818 9	0.533 6	0.987 3	0.881 9
1989	0.612 4	0.548 7	0.587 3	0.586 5	0.744 7	0.816 1
1990	0.830 2	0.883 1	1.009 8	0.549 3	0.704 0	0.937 0
1991	0.959 4	0.568 1	0.694 4	0.480 2	0.871 1	0.830 4
1992	0.769 7	0.667 0	0.800 7	0.520 0	0.973 3	0.746 8
1993	0.801 4	0.730 6	0.698 1	0.577 1	0.456 1	0.775 3
1994	0.746 8	0.980 0	0.621 8	0.481 1	0.727 8	0.656 3
1995	0.752 2	0.695 5	0.527 3	0.453 0	0.652 0	0.890 6
1996	0.858 1	0.787 0	0.754 6	0.513 6	0.605 3	0.769 2
1997	0.624 1	0.764 4	0.441 2	0.645 6	0.609 3	0.882 2
1998	0.883 7	0.774 0	0.473 1	0.457 9	0.654 4	0.757 3
1999	0.946 5	0.873 4	0.423 1	0.471 5	0.475 5	0.694 4
2000	0.463 3	0.435 0	0.480 7	0.436 0	0.577 8	0.574 5
2001	0.659 5	0.576 9	0.663 8	0.524 3	0.442 6	0.659 1
2002	0.726 4	0.670 2	0.534 5	0.930 7	0.619 7	0.800 7
2003	0.452 7	0.420 1	0.440 1	0.540 5	0.404 2	0.579 2
2004	0.345 6	0.343 7	0.659 9	0.603 5	0.415 5	0.339 5
2005	0.689 7	0.632 4	0.478 5	0.378 8	0.552 6	0.736 1
2006	0.796 8	0.712 8	0.417 3	0.347 1	0.401 3	0.988 8
2007	0.583 6	0.528 9	0.357 7	0.333 0	0.352 5	0.851 2

接下表

续表 2

年份 Year	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$
2008	0.780 9	0.986 8	0.429 9	0.364 4	0.665 5	0.750 6
2009	0.722 0	0.602 4	0.370 1	0.390 8	0.474 7	0.949 9
2010	0.641 2	0.586 7	0.449 1	0.452 0	0.380 4	0.724 5
2011	0.608 5	0.562 0	0.447 5	0.417 0	0.447 7	0.648 6
2012	0.605 9	0.558 2	0.451 5	0.331 1	0.330 6	0.628 8
2013	0.957 7	0.783 0	0.390 9	0.334 8	0.425 3	0.951 1
2014	0.521 9	0.429 9	1.019 9	0.336 2	0.423 3	0.356 2
2015	0.930 7	0.757 9	0.454 2	0.341 8	0.366 6	0.838 7
2016	0.550 8	0.517 1	0.479 5	0.374 8	0.3655	0.531 0
2017	0.588 7	0.538 7	0.391 7	0.386 5	0.365 7	0.678 6
$r_i$	0.687 0	0.662 4	0.596 8	0.542 5	0.559 4	0.707 3

注： $r_1$  为年均降水量的关联度； $r_2$  为年均蒸发量降水量的关联度； $r_3$  为年均温度降水量的关联度； $r_4$  为年最低温度降水量的关联度； $r_5$  为年最高温度降水量的关联度； $r_6$  为年均湿润度指数降水量的关联度

Note:  $r_1$  was correlation degree of annual precipitation;  $r_2$  was correlation degree of annual evaporation and precipitation;  $r_3$  was correlation degree of annual temperature and precipitation;  $r_4$  was correlation degree of annual minimum temperature precipitation;  $r_5$  was correlation degree of annual maximum temperature precipitation;  $r_6$  was correlation degree of annual humidity index and precipitation

### 3 结论与讨论

在灰色关联分析中,被评价序列与参考序列之间的灰度值越大,说明两者之间的关联性越强<sup>[14]</sup>。关联度值越大,表明被评价的序列因子对杉木年轮的关联性越强,对其生长的影响也越大。该研究以杉木年轮的宽度值为参考序列,以降水和温度等因子为参考序列,得到年均湿润度指数是影响杉木年轮生长的主导因子,之后为降水因子和温度因子。年均湿润度指数,即年均降水和年均温度的综合作用对杉木年轮生长的影响最大,这与在宁夏地区研究得出降水是影响河东沙地树轮生长的主导因子的结果不同,这可能是因为在井冈山地区雨热不同期,不能为杉木年轮生长提供最优的条件。井冈山地区属于亚热带湿润气候区,4—6月是其降水期,存在干湿季节,雨热不同期。在4—6月,井冈山地区降水最为集中,而此时的温度相对较低,达不到七八月的温度,此时温度成为限制杉木生长的主要因子;同时过多的降水影响杉木根系的呼吸作用,影响其对水分和营养元素的吸收,不利于杉木的快速生长。7—8月,温度虽然达到一年中的最高值,但此时井冈山地区的梅雨季节已经消失,降水量相对较少,此时降水因子成为影响杉木生长的主导因子,再加上高温使杉木的蒸腾作用加强,叶片气孔会出现短暂关闭的现象,影响杉木的光合作用,使其生长速度不能达到理想的速度。总之,由于井冈山地区雨热不同期,使得杉木年轮的生长达不到雨热均最适状态下的生长速度,因此降水和温度的综合作用对井冈山杉木年轮的灰色关联度值最大,成为影响杉木年轮生长的主导因子。

若单纯地分析温度和降水因子对杉木年轮生长影响的大小,从灰色关联度值可以看出,降水因子高于温度因子的灰色关联度值,这说明降水对杉木年轮生长的影响高于温度,这与邢秋茹等<sup>[18]</sup>在广东研究得出的结果一致。这是因为井冈山地处中亚热带地区,纬度相对较低,光照时间相对较长,温度相对较高,能够满足杉木光合作用的周期较长,再加上杉木蒸腾作用较强,其吸收的水分大量被蒸腾到空气中,使得水分因子较温度因子对杉木年轮生长的影响更大。

该研究结果表明,影响杉木年轮生长的6个气候因子的灰关联度值表现为年均湿润度指数(0.707 3)>年均降水量

(0.687 0)>年均蒸发量(0.662 4)>年均温度(0.596 8)>年最高温度(0.559 4)>年最低温度(0.542 5),年均湿润度指数是影响井冈山杉木林年轮生长的主要因子,降水因子次之,温度因子影响最小。

### 参考文献

- [1] 李牧,王晓春.敦化三大硬阔红松年轮—气候关系及生长季低温重建[J].南京林业大学学报(自然科学版),2013,37(3): 29-34.
- [2] 曹受金,曹福祥,项文化.利用树木年轮重建赣南地区1890年以来2—3月份温度的变化[J].生态学报,2012,32(20): 6369-6375.
- [3] 王兵,高鹏,郭浩,等.江西大岗山林区樟树年轮对气候变化的响应[J].应用生态学报,2009,20(1): 71-76.
- [4] 吕珊珊,王晓春.大兴安岭北部阿里河樟子松年轮气候响应及冬季降水重建[J].东北师大学报(自然科学版),2014,46(2): 110-116.
- [5] 郑广宇,王文杰,王晓春,等.帽儿山地区兴安落叶松人工林树木年轮气候学研究[J].植物研究,2012,32(2): 191-197.
- [6] 陈礼清,余海洋,杨旭,等.川西南柳杉年轮宽度指数与气候变化的关系[J].四川农业大学学报,2012,30(3): 293-299.
- [7] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,等.树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J].中国科学D辑,2004,32(2): 145-153.
- [8] 梁尔源,邵雪梅,胡玉熹,等.内蒙古草原沙地白栎年轮生长指数的变异[J].植物生态学报,2001,25(2): 190-194.
- [9] 刘思峰.灰色系统理论的产生与发展[J].南京航空航天大学学报,2000,36(2): 267-272.
- [10] 王学萌,穆月英,唐冀东.灰色系统分析方法论初探[J].系统辩证学学报,1995,3(2): 85-90.
- [11] PIERMATTEI A, CRIVELLARO A, CARRER M, et al. The "blue ring": Anatomy and formation hypothesis of a new tree-ring anomaly in conifers[J]. Trees, 2015, 29(2): 613-620.
- [12] XU G B, LIU X H, QIN D H, et al. Relative humidity reconstruction for northwestern China's Altay Mountains using tree-ring  $\delta_{18}O$  [J]. Chinese science bulletin, 2014, 59(2): 190-200.
- [13] ZHAO X Y, QIAN J L, WANG J, et al. Using a tree ring  $\delta^{13}C$  annual series to reconstruct atmospheric  $CO_2$  concentration over the past 300 years [J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 371-379.
- [14] 王士强,胡银岗,余奎军,等.小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析[J].中国农业科学,2007,40(11): 2452-2459.
- [15] LUO D. Risk evaluation of ice-jam disasters using gray systems theory: The case of Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River [J]. Nat Hazards, 2014, 71: 1419-1431.
- [16] WANG Z, GAO Y, QIN P. Detection of gross measurement errors using the grey system method [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2002, 19(11): 801-804.
- [17] 张德成,殷鸣放,魏进华.用灰色关联度法评价森林涵养水源生态效益:以辽东山区主要森林类型为例[J].水土保持研究,2007,14(4): 96-99, 104.
- [18] 邢秋茹,刘鸿雁,孙艳荣,等.广东阳春现代樟树树轮宽度变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2004,24(9): 2077-2080.